

В. В. ЕРМУРАТСКИЙ,
П. В. ЕРМУРАТСКИЙ

ПОЧТИ ВСЕ О КОНДЕНСАТОРАХ



УДК 621.319.4

Ермуратский В. В., Ермуратский П. В. Почти все о конденсаторах. — Кишинев: «Штиинца», 1979. 132 с. с рис. (АН МССР. Отдел энергетической кибернетики).

В работе излагается краткая история изобретения и совершенствования конденсаторов. Описываются происходящие в них физико-химические процессы. Показана связь долговечности конденсаторов с этими процессами и условиями эксплуатации.

Приводятся сведения о некоторых природных накопителях электрической энергии и «естественных» конденсаторах, в том числе о конденсаторах-«паразитах». Популярно изложены вопросы безопасности при обращении с конденсаторами.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, знакомых с основами физики в объеме средней школы.

Ответственный редактор
доктор технических наук
профессор А. В. НЕТУШИЛ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Конденсатор от изобретения до наших дней . .	6
1. Банка, «потрясая» Европу.	6
2. Совершенствование и применение первых конденсаторов	8
3. Эволюция конденсаторов и областей их применения	16
Глава II. Что происходит в конденсаторе?	54
4. Некоторые сведения о строении вещества	54
5. Поляризация и деполяризация диэлектрика	56
6. Абсорбция и десорбция в диэлектриках	62
7. Нагрев и охлаждение конденсаторов	68
8. Ионизационные процессы в конденсаторах	71
9. Электрохимические явления в конденсаторах . . .	74
10. Магнитное поле в конденсаторах	75
11. Механические явления в конденсаторах	78
12. Самовосстановление и «самозалечивание» в конденсаторах	80
13. Шумы в конденсаторах	82
14. Нелинейные явления в конденсаторах	83
Глава III. Как долго «живут» конденсаторы	87
15. Надежность — основное требование к конденсаторам	87
16. Отказы конденсаторов	88
17. От чего зависит долговечность конденсаторов . .	94
18. Как и чем обеспечивается надежность конденсаторов?	98
Глава IV. Конденсаторы вокруг нас	101
19. Природные конденсаторы	101
20. «Естественные» конденсаторы	105
21. Конденсаторы-«паразиты»	110
Глава V. Когда, почему и насколько бывают опасными конденсаторы?	119
22. Чем опасны «естественные» конденсаторы?	119
23. Какую опасность представляют конденсаторы сосредоточенной емкости?	121
24. Как сделать обращение с конденсаторами безопасным?	126
Рекомендуемая литература	130

ВВЕДЕНИЕ

Электрический конденсатор — это устройство, состоящее из системы проводящих электрический ток обкладок и диэлектрика (изоляционного материала) между ними. Наряду с резисторами, катушками индуктивностей и трансформаторами он основной пассивный элемент электрических цепей. Количество конденсаторов, как элемента схемы, особенно велико для слаботочных устройств: достигает 40 процентов и более. Абсолютное их число в некоторых сложных электронных устройствах, например в вычислительных машинах, — десятки и сотни тысяч.

Существует большое разнообразие схемных применений конденсаторов, но используется их основное свойство — накапливать (и соответственно отдавать) электрическую энергию (импульсные, накопительные, демпфирующие, времязадающие и другие конденсаторы) и свойства, вытекающие из основного, — способность создавать ток, опережающий по фазе напряжение (фазовращатели, компенсаторы реактивной мощности и т. д.), и изменять свое сопротивление с частотой.

Электрический конденсатор — одно из немногих изобретений человечества, которое длительное время практически не применялось. Случайно сделанное в XVIII веке открытие эффекта накопления электрических зарядов лейденской банкой было как бы преждевременным, ибо появилось раньше, чем возникла необходимость и возможность его использования*.

Конденсатор прошел длительную эволюцию, первоначально в значительной мере определявшейся развитием областей, где его применение было обязательным. Но позже их стали использовать и тогда, когда они улучшали характеристики установок, например, увеличивали их мощность, обуславливали экономию электрической энергии. Решающую роль в «судьбе» электрических конденсаторов сыграло изобретение и развитие радио, электронных ламп, внедрение в электроэнергетику и промышленность системы переменного тока.

В настоящее время конденсаторы всевозможных размеров, свойств и назначений широко используются в электронике, электротехнике и электроэнергетике. Только перечисление областей применения и видов конденсаторов, не говоря уже об особенностях их работы в различных схемах, заняло бы многие страницы.

В год в мире выпускаются десятки миллиардов конденсаторов и производство их продолжает расти.

Расширение областей использования конденсаторов и повыше-

* Широкое применение конденсаторов началось в XX веке.

ние требований, которым они должны удовлетворять, обусловили интенсивные научные исследования как самих конденсаторов, так и материалов, из которых они изготавливаются. Материалы, а также технология производства и определяют дальнейший прогресс в конденсаторостроении.

Хотя конденсаторы просты по своему устройству, они имеют сложные и разнообразные (для пассивных элементов) конструкции.

Тщательным и продолжительным изучением выявлен комплексный характер электрофизических и электрохимических процессов, происходящих в конденсаторах. Часть качественных и многие количественные характеристики этих процессов продолжают изучаться. Внешняя простота конденсаторов оказалась обманчивой. Это каждый раз обнаруживается при использовании их в новых условиях. И в результате возникает необходимость исследовать те их свойства, знание которых ранее было необязательным. Например, задача снижения погрешности решения уравнений на аналоговых вычислительных машинах обусловила необходимость изучения абсорбционных свойств конденсаторов. Часто исследователи не успевают изучить одну конструкцию конденсатора, как появляется другая — более совершенная.

(Под конденсатором обычно понимается элемент с сосредоточенной емкостью, т. е. такой, в котором энергия накапливается в электрическом поле, занимающем сравнительно небольшой объем. Для уменьшения габаритов конденсаторов разрабатываются такие конструкции, в которых плотность энергии была бы наибольшей.

Но человеку приходится иметь дело с большинством объектов, обладающих так называемой распределенной емкостью.

Имеются природные накопители, например облака. Они в узком смысле не являются конденсаторами, так как у них отсутствуют явно выраженные обкладки. Однако свойство накапливать энергию в электрическом поле позволяет рассматривать их как электрические конденсаторы.

Эти две группы конденсаторов (с распределенной емкостью и природные накопители) обычно редко проявляют себя, но данные проявления своеобразны и заслуживают определенного внимания.

В книге не рассмотрены многие специальные виды конденсаторов, такие как рабочие элементы установок диэлектрического нагрева, емкостные датчики и другие, а также ряд областей применения, особенности конструкций и использование конденсаторов, поскольку ограниченный объем, а также специализация авторов не представляют возможность это сделать.

Глава I

КОНДЕНСАТОР ОТ ИЗОБРЕТЕНИЯ ДО НАШИХ ДНЕЙ

1. Банка, «потрясшая» Европу

История не сохранила детальных обстоятельств изобретения конденсатора. Его автором считают Ван Мушенбрека — профессора университета г. Лейдена (Нидерланды). Существует также версия, что удивительное свойство конденсатора накапливать электрическую энергию и отдавать ее с большим эффектом в конце 1745 года обнаружил обучавшийся у Мушенбрека студент Кунеус на собственном, отнюдь не из приятных опыте.

Несколько ранее (в октябре 1745 года), независимо от Мушенбрека, прелат собора в г. Камине (Померания) Эвальд Георг фон Клейст, пытался «провести» электричество от электрофорной машины в бутылку с водой через гвоздь, пробитый сквозь пробку. Прикоснувшись к гвоздю рукой, другой он держал бутылку, Клейст почувствовал сильный удар, заставивший его уделить этому «сосуду» большое внимание.

Однако в силу известности Мушенбрека в научном мире того времени, а возможно, и большей рекламы сделанного им открытия первый конденсатор получил всемирную известность как лейденская банка.

Открытие свойства накопления электрических зарядов лейденской банкой произошло случайно, при экспериментах с электрическим генератором, или, как он тогда назывался, машиной Отто фон Герике*.

* Отто фон Герике — комендант города Магдебурга середины XVII века, в перерывах между служебными и жизненными неурядицами проводил разнообразные эксперименты. Он, в частности, изобрел, испытал и многократно демонстрировал «Магдебургские полушария». Это были две полусферы, из которых откачали воздух и которые вследствие атмосферного давления невозможно было разнять. Машина Герике представляла собой шар, состоящий из серы. Он электризовался при трении о ткань, находившуюся в руке экспериментатора.

В то время в науке существовало представление об электричестве как о невидимой, неосязаемой, невесомой жидкости, которая образуется при трении различных веществ — серы, янтаря, сургуча, стекла о кожу, шерсть, ткань и т. д. Было известно и то, что электричество способно притягивать легкие предметы — пушинки, бумажки и т. д. Знали также, что эта «электрическая жидкость» может «перетекать» по металлам или увлажненным ниткам.

По аналогии с водяным паром ученые тогда полагали, что в воздухе содержится электрический пар, который, сгущаясь, превращается в жидкость и удерживается на поверхности некоторых веществ. Так как устройство для сгущения (конденсации) водяных паров и превращения их в жидкость в паровых машинах называлось конденсатором. Бенджамен Франклин* лейденской банке дал второе название — конденсатор, сохранившее представление о природе электричества тех сравнительно недавних времен.

«Электрическая жидкость», образующаяся на поверхности некоторых тел, сравнительно быстро исчезала — «испарялась», как тогда считали. Сейчас уже известно, что происходит утечка зарядов по поверхности несовершенных диэлектриков и их нейтрализация, но тогда природа и свойства статического электричества не были ясны.

Исходя из существовавших представлений, вероятно, и был поставлен опыт, в результате которого предполагалось накопить как можно больше «электрической жидкости». С этой целью электрофорная машина Герике, усовершенствованная Хоксби, с помощью мушкетного ствола и цепи, подвешенных на шелковых нитях (настоящая линия электропередачи!), была соединена с металлическим стержнем, пропущенным через пробку, закрывающую стеклянный сосуд с водой. Вода, по замыслу экспериментаторов, должна была электризоваться, т. е. удерживать в себе электрическую жидкость, поступавшую от машины Герике.

Банку в руке держал экспериментатор (рис. 1). Количество «наливавшейся» в нее «электрической

* Бенджамен Франклин (1706—1709) ввел также в употребление термины батарея, проводник, заряд, разряд, обмотка, источник, «плюс», «минус» и другие термины, которые применяются и теперь.

жидкости» (что породило термин «емкость») определялось по интенсивности притягивания легких тел к гвоздю. Однако желаемый эффект не был достигнут по непонятной тогда для исследователей причине*. Эффект, потрясший человека, был обнаружен при касании второй рукой стержня, т. е. при замыкании цепи. Удар был настолько сильным, что Мушенбрек писал французскому ученому Реомюру: «Ради короны Франции не согласился бы я подвергнуться еще раз такому жуткому потрясению». Последующие события показали, что

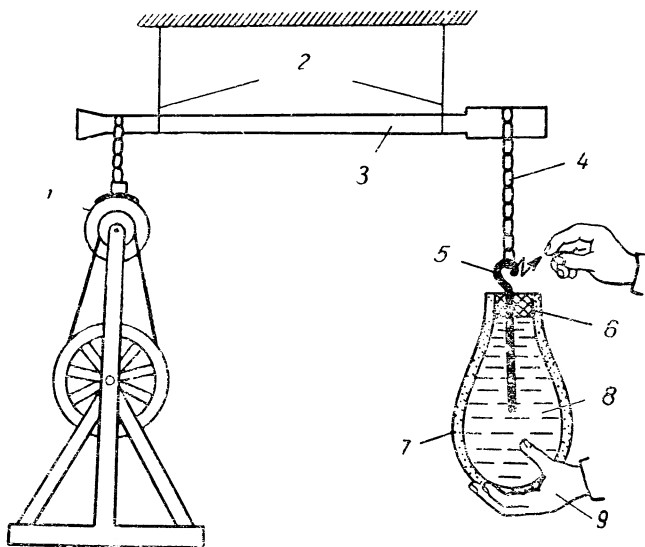


Рис. 1. Схема эксперимента Мушенбрека, в ходе которого было открыто потрясающее действие лейденской банки — первого конденсатора:

1 — электростатическая машина; 2 — шелковые нити (изоляторы); 3 — ствол мушкета (проводник); 4 — железная цепь (проводник); 5 — железный стержень (проводник); 6 — пробка (проходной изолятор); 7 — стеклянная бутылка (диэлектрик); 8 — вода (первая обкладка); 9 — рука (вторая обкладка)

* Причина этого явления, установленного значительно позже, была в следующем: накапливавшиеся на обкладках этого конденсатора свободные заряды не образовывали достаточно сильного внешнего электрического поля, которое могло действовать на бумажки и пушинки, так как концентрировалось оно между обкладками, т. е. в толще стекла.

нашлось много желающих испытать на себе действие лейденской банки без всяких условий.

Весть об удивительном и сильном ударе электричества, накапливаемого в лейденской банке, быстро распространилась по всей Европе и за ее пределами. Многие известные ученые в разных странах повторяли опыты с лейденской банкой.

Простота изготовления «банки» и проведения эксперимента вызвала лавину демонстраций «силы» лейденского «чуда». Ни одно из изобретений или открытий, включая электрофорные машины, не производило тогда такого впечатления, как эта «простая» банка. Ее действие показывали во дворцах, на высоких научных собраниях, даже на ярмарках, где каждый желающий за плату мог испытать на себе силу удара «электрической жидкости». Многие «развлекались» на дому: разряжали лейденскую банку на своих наиболее смелых гостях, наблюдая за реакцией.

Во всех этих экспериментах интересным являлась произвольная реакция человека на электрический разряд высокого напряжения: его лицо искажалось, он подпрыгивал, руки дергались и т. д. Проявляемые таким образом ощущения «подопытного» забавляли и удивляли людей.

Больше всего поражало то, что это потрясение происходило без внешнего механического действия. Удар возникал как бы сам собой. Ощущения были не из приятных, но сильно удивляли. Все это было новым для человечества. Люди еще не знали о свойстве мышц живых существ сокращаться при воздействии на них электрического тока. Понадобилось еще около 15 лет, чтобы, благодаря опытам Гальвани, наступила некоторая ясность. А пока лейденская банка, вызвавшая эффект разорвавшейся бомбы, быстро распространилась по Европе и попала даже в Новый Свет — в Америку.

2. Совершенствование и применение первых конденсаторов

Первые «исследования» лейденской банки, имеющие определенное научное значение, осуществили, как ни странно, парижские монахи и королевские муш-

кетеры, но, естественно, не по своей воле. Разряд достаточно мощной лейденской банки на цепочку из 700 монахов, взявшихся за руки, заставил их одновременно вскрикнуть и повторить судорожные движения, неоднократно наблюдавшиеся ранее при «индивидуальных» экспериментах.

На 180 мушкетерах провел такой же эксперимент придворный «электрик» аббат Нолле. Приказ короля был стойко выдержать удар. Но перед ударом лейденской банки оказалась бессильной даже гвардейская дисциплина: «Первый держал в свободной руке банку, а последний извлекал искру; удар почувствовался всеми в один момент. Было очень курьезно видеть разнообразие жестов и слышать мгновенный вскрик, исторгаемый неожиданностью у большей части получающих удар». Эти эксперименты позволили сделать тогда важный вывод: электричество протекает очень быстро, так как все участники одновременно почувствовали удар.

Сейчас можно оценить величину напряжения, до которого заряжались лейденские банки. Если принять, что для достаточно сильного «ощущения» необходимо напряжение около 100 В, то, учитывая последовательное «включение» людей в цепочке при экспериментировании, лейденская банка монахов была заряжена до напряжения 70 000 В, а мушкетеры не выдержали удара в 18 000 В. Конечно, можно потребовать коррекции на различную физическую и психологическую подготовленность монахов и мушкетеров. Но и тогда оценка напряжения на лейденских банках даст величину, достигающую нескольких десятков тысяч вольт.

Однако емкость лейденских банок — примерно от 100 до 1 000 пФ и энергия, накапливаемая в них, — $10^{-4} \div 10^{-3}$ Дж были сравнительно невелики, что и объясняет благополучный исход большинства экспериментов*. Вследствие малой емкости разряд был очень

* Джоуль (Дж) — единица измерения энергии или работы. 1 Дж равен ватт-секунде, т. е. джоуль — это энергия или работа источника (или приемника), отданная (совершенная или полученная) в течение 1 секунды при его мощности 1 Вт. 1 кВт·ч равен 3600 Вт·с, или 3600 Дж.

Пикофарада (пФ) — единица измерения электрической емкости. $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$.

Фарада (Ф) — это емкость конденсатора, у которого напряжение на обкладках изменяется на один вольт (1 В) при изменении его заряда на один кулон (1 Кл).

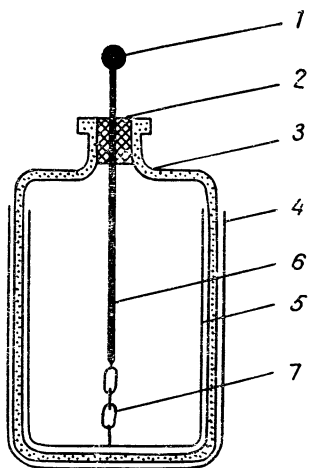


Рис. 2. Устройство усовершенствованной лейденской банки:

1 — медный шар; 2 — пробка; 3 — стеклянный сосуд; 4 — наружная обкладка; 5 — внутренняя обкладка; 6 — металлический стержень; 7 — цепочка, обеспечивающая контакт стержня с внутренней обкладкой

кратковременным: его можно оценить величинами порядка $10^{-5} \div 10^{-7}$ секунды при разряде на одного человека и порядка $10^{-3} \div 10^{-4}$ секунды в опыте с монахами.

В результате многочисленного экспериментирования лейденская банка совершенствовалась. Изнутри и снаружи ее покрывали тонкими листами металла (обычно оловянной фольгой). Внутренний слой соединялся со стержнем с помощью цепочки (рис. 2). Предлагалось и специальное устройство для разряда лейденской банки: изогнутая проволока с медными шариками на концах, укрепленная на изолирующей (обычно деревянной) ручке (рис. 3). Касаясь одним шаром наружного слоя металла и подводя второй шарик к выступающему из пробки стержню, можно было вызывать

искру, возникавшую в результате электрического пробоя воздуха и сопровождавшуюся громким треском. На стержне (выводе) банки тоже стали укреплять шарик, так как обнаружили, что при этом искра получается более мощной.

Теперь известно, что шарики делали электрическое поле равномернее, а следовательно, воздух пробивался при более высоком напряжении.

Однако большая часть «тайн» лейденской банки была открыта благодаря исследованиям более системного характера, выполненным Бенджаменом Франклином, талантливым американским ученым, дипломатом, писателем, самой выдающейся и популярной личностью того времени. Он занимался физикой, начав со всеобщего увлечения — лейденской банкой и электричеством.

Франклин провел серию целенаправленных экспериментов и установил, что электрическая энергия накапли-

вается в стекле сосуда. Это он определил, последовательно исключая металлический стержень и заменяя воду «ненаэлектризованной водой из чайника». Вода, обладающая определенным сопротивлением электрическому току, как мы это сейчас уже понимаем, уменьшала силу разряда. Следующий гениально простой эксперимент позволил окончательно доказать, что электрический заряд накапливается именно стеклом и не зависит от формы сосуда. Франклин сделал плоский конденсатор, поместив оконное стекло между двумя полосками свинца, и получил тот же результат, что и с банкой.

Последовательным развитием этих экспериментов Франклин установил, что сила разряда тем больше, чем тоньше стекло и больше площадь полосок металла — обкладок, как он их называл. Он же открыл, что сила разряда увеличивается, если соединить две банки вместе. С помощью двух 20-литровых банок, соединенных вместе, Франклин убивал домашнюю птицу, испытывая параллельное и последовательное соединения двух конден-

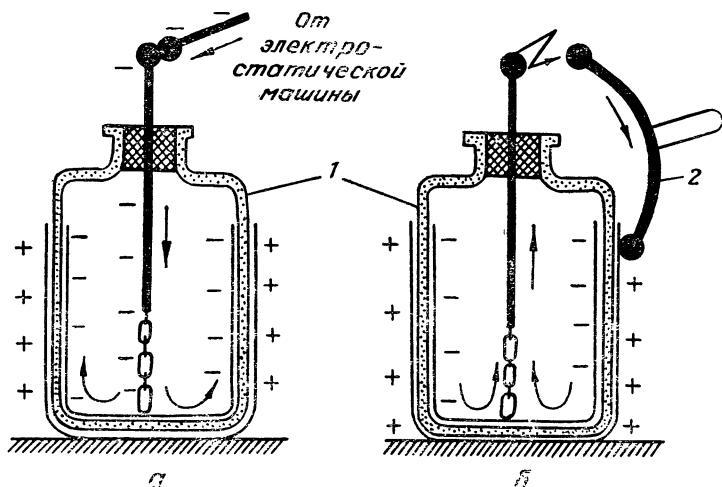


Рис. 3. Движение и расположение электрических зарядов при заряде (а) и разряде (б) лейденской банки:

1 — лейденская банка; 2 — разрядник

саторов, как мы сейчас сказали бы*. Однажды ученый сам чуть не стал жертвой этих экспериментов, испытав сильный шок. Франклин установил и тепловое действие электричества, разряжая лейденскую банку вблизи ртутного термометра.

Он использовал лейденскую банку и для доказательства единства природы молнии и электрической искры этой банки. Для этого через увлажненную шелковую нить и запущенного в небо змея исследователь заряжал банку, а затем разряжал ее обычным способом. По аналогии с пушечной две и более лейденских банок, соединенных вместе, Франклин называл «батареей». Он также обнаружил, что разрядом лейденской банки можно поджигать спирт и другие легко воспламеняющиеся вещества.

Вершиной творчества ученого в области электричества явилось его объяснение, близкое к современному. Ученый говорил, что электричество состоит из мельчайших частиц — зарядов, которые легко проникают и передвигаются внутри металлов, и что избыток или недостаток этих частиц вызывает положительный или отрицательный заряд, т. е. электричество имеется только одного вида, а не «смоляное», «стеклянное» и др., как это утверждали до него.

Не зная о существовании электронов и знака их заряда, Франклин предположил, что «электрическая жидкость» движется от «плюса» к «минусу»**. Этим он в значительной мере объяснил принцип действия лейденской банки. Франклин установил, что банка, присоединенная к электростатической машине, «заряжается»

* Индюки, гуси и другие домашние птицы служили Бенджамину Франклину индикатором силы удара банок, поскольку тогда не было приборов для измерения напряжения на банке, величины тока, а также емкости банки. Они появились примерно спустя 100 лет после опытов Франклина.

** Такое направление электрического тока сохранилось и теперь. В действительности, электроны (реальные частицы «электрической жидкости»), открытые Джозефом Джоном Томсоном в 1898 году, перемещаются в сторону более высокого потенциала, т. е. от «минуса» к «плюсу». Это, однако, не умаляет гениальной догадки Франклина, так как выбор направления тока условен и определяется конкретными носителями зарядов. Например, направление тока, вызванного положительными ионами, совпадает с направлением движения ионов и т. д.

(накапливает «заряды»), а при замыкании обкладок — «разряжается» (см. рис. 3).

Франклин также установил, что количество накопленного электричества тем больше, чем с большей скоростью вращается стеклянный барабан электростатической машины, т. е. чем выше развиваемый ею потенциал.

Эти сведения, известные сейчас каждому выпускнику средней школы, в те времена были величайшим достижением научной мысли, а сама постановка экспериментов явилась поворотным моментом в методологии науки и исследованиях электричества.

В России лейденские банки с фольговой обкладкой снаружи и наполненные мелкой дробью внутри, игравшей роль второй обкладки, в 50-е годы XVIII века изготавливал механик Санкт-Петербургской Академии наук Иван Соколов. Использовались эти конденсаторы М. В. Ломоносовым и Г. В. Рихманом* в экспериментах, в том числе с атмосферным электричеством.

Профессор физики Санкт-Петербургской Академии наук Франц Ульрих Теодор Эпинус, как и Франклин, предложил близкое к современному объяснение принципа действия лейденской банки. Он доказал, что конденсатор можно изготовить не только с применением стекла, но и с применением такого диэлектрика («электрического тела», как тогда назывались вещества, обладавшие свойством изоляторов), как воздух.

В те же времена была обнаружена возможность пробоя диэлектрика — воздуха между обкладками — при малом расстоянии между ними или в виде поверхностного разряда по стеклу в лейденской банке. Это привело к тому, что фольгой стали покрывать банку не по всей высоте, а только на $2/3$ ее. Для получения той же силы разряда фольгой оклеивали также дно банки.

Однако как бы ни были гениальны и изобретательны Франклин и его современники, отсутствие, как сейчас говорят, областей и соответственно потребностей приме-

* Г. В. Рихман — выдающийся русский физик (1711—1753). Изобрел электрометр, впервые при изучении электрических явлений использовал количественные измерения. Изучал зависимость электроемкости тел от их формы и массы, явления электропроводности и электризации. Открыл явление электростатической индукции. Вместе с М. В. Ломоносовым (1711—1765) проводил исследования атмосферного электричества. Погиб от удара молнии из-за отсутствия заземления у экспериментальных устройств.

нения конденсаторов не способствовало их совершенствованию. Интерес к опытам с лейденской банкой постепенно ослабевал, поскольку не было новых результатов. Они повторялись уже без особых изменений в течение почти ста лет, став предметом салонных развлечений и скромного применения в научных исследованиях.

Это были в начале XIX века опыты французского физика Феликса Савара по намагничиванию стальной иглы путем разряда лейденской банки на спираль из металлической проволоки, в которой находилась игла (рис. 4). Он обнаружил необъяснимое явление: северный и южный магнитные полюса возникали на игле при разряде лейденской банки на спираль случайным образом.

Сейчас для объяснения этого явления необходимо знать особенности намагничивания стали (гистерезис, коэрцитивную силу, насыщение и т. д.), характеристики затухания колебаний в контуре, влияние на них нелинейности электрической дуги и ее прерывистости при несовершенном контакте, при замыкании и других факторах и явлениях. Тогда это, тем более математическое описание процессов, не было известно. Спустя много десятилетий исследователь Феддерсен, выполнив раз-

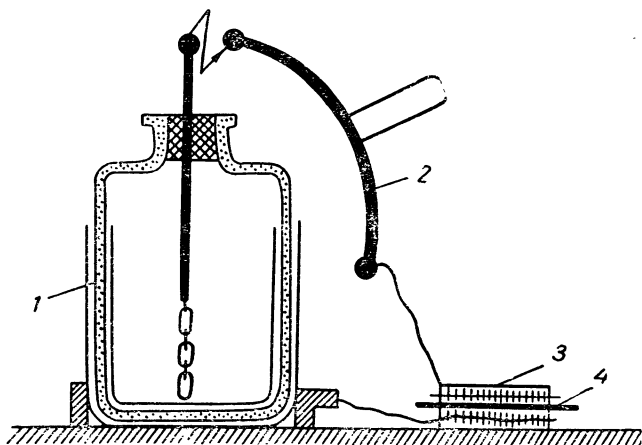


Рис. 4. Схема эксперимента Савара по намагничиванию стальной иглы путем разряда лейденской банки на соленоид:

1 — лейденская банка; 2 — разрядник; 3 — соленоид (катушка с большим числом витков); 4 — стальная игла

вернутую во времени фотографию искры при разряде лейденской банки, выяснил основную причину неудачи Савара — колебательный характер разряда*.

К концу XIX века уже довольно хорошо было известно, что «разряд конденсатора может быть или обыкновенным, представляющим быстро ослабевающее течение электричества, или колебательным». Победное шествие постоянного, так называемого динамического, тока, начавшееся в XIX веке с создания профессором физики Алессандро Вольты в 1800 году гальванической батареи — источника электрической энергии, надолго прервало интерес к лейденской банке.

Однако последовавшая затем цепь открытий различных законов, объяснявших электричество и магнетизм, а также изобретение устройств, использовавших данные явления, в конечном итоге подготовили почву для широчайшего применения конденсаторов. Имена этих ученых и исследователей навечно воплощены в названиях единиц измерения электрических и магнитных величин: вольт, ампер, ом, фарада, генри, эрстед, максвелл, вебер, гаусс и др.** Среди ученых, изучавших электрические явления, непосредственное отношение к развитию представлений о конденсаторе имели Майкл Фарадей и Джозеф Генри***.

Фарадей ввел понятие о диэлектрической проницаемости веществ, а Генри изучал разряды лейденской бан-

* По существу, эти эксперименты и разряды лейденской банки с помощью устройства (см. рис. 2) были первыми экспериментами с колебательным LC-контуром, в котором лейденская банка была конденсатором, а катушка — провода или катушка в опыте Феликса Савара. Разряды в экспериментах с людьми имели аperiодический характер (ток разряда не изменял направления).

** Отдавая дань заслугам этих ученых, сокращенные обозначения электрических величин пишутся с большой буквы (220 В, 10 А, 50 Ф и т. д.).

*** Майкл Фарадей (1791—1867) и Джозеф Генри (1797 — 1878) независимо друг от друга открыли явление электромагнитной индукции — возникновение электродвижущей силы в проводнике при изменении магнитного поля. Фарадей, однако, опубликовал первым свое открытие и считается родоначальником электромагнетизма. Генри установил свойство самоиндукции в проводниках, усовершенствовал электромагнит, применив для его намотки провод с изоляцией, что позволило значительно увеличить число витков и силу притяжения магнита. Генри также изобрел реле-электромагнит с контактами, которые затем использовал Сэмюэл Морзе в своем телеграфе.

ки на катушку с большим количеством витков и установил колебательный характер таких разрядов.

Генри и Фарадей были гениальными экспериментаторами. Они интуитивно понимали сущность возникающих явлений и давали им ясную и образную интерпретацию. В частности, Фарадею мы обязаны представлением о силовых линиях-трубках магнитного и электрического полей.

Однако понадобился гениальный ум Джеймса Клерка Максвелла, чтобы обобщить и сжато — языком математических формул — суммировать знания об электричестве и магнетизме, создав тем самым теорию электромагнитного поля. Незадолго до смерти (он умер в 1879 году в возрасте 48 лет) в результате длительного и упорного труда Максвелл вывел уравнения, фундаментально определившие электрические и магнитные свойства сред и показавшие взаимообусловленность переменных электрических и магнитных полей.

3. Эволюция конденсаторов и областей их применения

Предложения по применению конденсаторов в технике начали поступать в середине XIX века. Иохим Баггс получил патент на способ зажигания газовых светильников с помощью разряда конденсатора, а затем на применение конденсаторов в телеграфе.

В 1877 году русскому ученому П. Н. Яблочкову был выдан патент на электрическую систему питания лампочек; в нем предусматривалось использование конденсаторов не только со стеклянным диэлектриком, но и с пропитанной парафином бумагой. Первые сведения о применении батареи таких конденсаторов для повышения коэффициента мощности в распределительной сети относятся к 1895 году.

Для частотного разделения телеграфных и телефонных сигналов, передаваемых по одним и тем же проводам, первым в России применил в 1880 году конденсаторы в фильтрах инженер-капитан Г. Г. Игнатьев.

Все эти немногочисленные примеры свидетельствуют о крайне ограниченном использовании конденсаторов в технике. Причина в том, что вплоть до конца XIX века

вся практическая электротехника базировалась на использовании систем постоянного тока, применять в которых конденсаторы не было никакой необходимости.

Положение резко изменилось в XX веке в связи с широким практическим применением электротехники переменных токов в радиосвязи и электроэнергетике. Весь путь дальнейшего совершенствования конденсаторов связан со стремительными и всевозрастающими темпами развития электроники и электротехники.

Это триумфальное шествие было еще впереди, а те далекие годы — конец XIX — начало XX века — ознаменовались величайшим изобретением и началом практического применения радио, или, как тогда говорили, беспроволочного телеграфа. Этому изобретению предшествовали гениально простые эксперименты Генриха Герца* с электрическими вибраторами и резонаторами, представлявшими собой, по сути дела, высокочастотные колебательные контуры с распределенной емкостью и индуктивностью.

В вибраторе Герца затухающие электромагнитные колебания возбуждались в результате электрического пробоя воздушного промежутка между шарами А и Б (рис. 5) при подаче к ним высокого напряжения от катушки Румкорфа. Электромагнитные волны излучались в пространство этим же вибратором**, т. е. он служил одновременно и генератором, и антенной. Второй контур, так называемый резонтор, являющийся индикатором электромагнитных волн, имел такие же размеры, как вибратор, благодаря чему обеспечивалась точная настройка «приемника» на частоту «передатчика».

Поскольку тогда не было никакого другого индикатора, способного реагировать на изменяющееся с огром-

* Генрих Герц (1857—1894) — выдающийся немецкий физик и Оливер Хевисайд (1850—1925) — гениальный английский физик-электротехник придали уравнениям Максвелла современную форму. Именем Герца названа единица частоты колебаний — один герц (1 Гц) — одно колебание в секунду.

Хевисайд — автор операторного метода расчета переходных процессов и символического метода расчета стационарных процессов в электрических цепях. Он на 15 лет раньше Альберта Эйнштейна вывел всемирно известное выражение, связывающее энергию и массу: $E = m \cdot C^2$.

** Современные многоэлементные антенны ультракоротких волн имеют вибраторы, напоминающие те, которые применял Герц.

ной частотой электромагнитное поле (около ста миллионов периодов в секунду в опытах Герца), гениальный Герц использовал для этого тот же принцип, что и для возбуждения колебаний в вибраторе — электрический пробой промежутка между шарами *А* и *Б* (см. рис. 5) на концах резонатора под действием наведенного электромагнитным полем напряжения. Практически пробой он наблюдал в виде слабой искры, проводя эксперименты в затемненной комнате.

Герц осуществил большое количество экспериментов, ставя между вибратором и резонатором преграды из различных материалов, располагая их на разном расстоянии и в разном положении. Благодаря этим экспериментам была доказана волновая природа электромагнитных явлений, экспериментально подтверждены свойства их распространения, явления преломления,

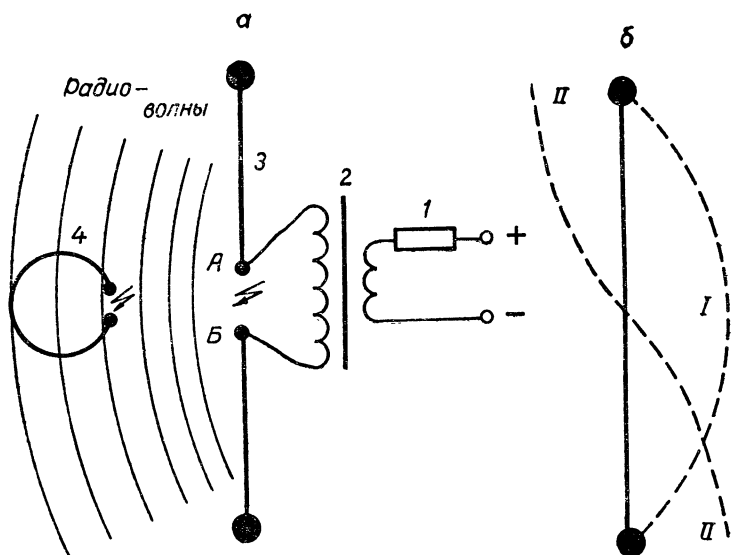


Рис. 5. Схема опытов Герца (а) и распределение тока (I) и напряжения (II) в вибраторе и резонаторе (б) согласно современным представлениям.

I — прерыватель тока; 2 — катушка Румкорфа; 3 — вибратор; 4 — резонатор; *A* и *Б* — шары разрядника

отражения, затухания и другие свойства, которые предсказывались теоретически уравнениями Максвелла.

Хотя, по существу, эксперименты Герца были первым применением «приемника» и «передатчика», такая система резонаторов не могла служить для передачи информации на большие расстояния, поскольку у «приемника» была слишком низкая чувствительность. Для возникновения искры в промежутке в 1 мм между шарами резонатора необходимо, чтобы в нем наводилось напряжение порядка нескольких тысяч вольт. Для возбуждения такого напряжения при той добротности и размерах резонатора, которые имелись в распоряжении Герца, требовалась напряженность электромагнитного поля около 10^3 вольт на метр. Это примерно в десять миллионов раз большая величина, чем чувствительность современных радиоприемников, и примерно в 10 000 раз больше той напряженности, которая нужна для обеспечения нормальной громкости простейшего детекторного приемника с наушниками*.

И только изобретение преподавателем Кронштадтской минной школы А. С. Поповым более чувствительного приемника радиоволн сделало реальной возможность осуществления дальней беспроводной связи с помощью электромагнитных колебаний**. А. С. Попов усовершенствовал систему регистрации электромагнитных волн благодаря применению когерера — трубки с металлическим порошком, сопротивление которого изменялось под действием электромагнитных импульсов. Для усиления волн и повышения чувствительности он использовал антенну (отрезок провода, подсоединив его к когереру).

Несколько позднее, на первых порах развития радиотехники, от кратковременных импульсов затухающих колебаний, которые генерировали искровые передатчики, перешли к незатухающим колебаниям. Электромагнитные колебания возбуждались с помощью дуговых генераторов, схема одного из них показана на рис. 6. В них

* Изобретателем одной из разновидностей этого приемника (1922) был советский инженер О. В. Лосев. Этот приемник назывался кристадином Лосева.

** Первое применение радиосвязи состоялось в январе 1900 года на расстоянии около 45 км при проведении работ по снятию с мели броненосца русской балтийской эскадры «Апраксин». Тогда же была послана радиограмма командиру ледокола «Ермак» о необходимости спасения рыбаков, которых унесло на льдине.

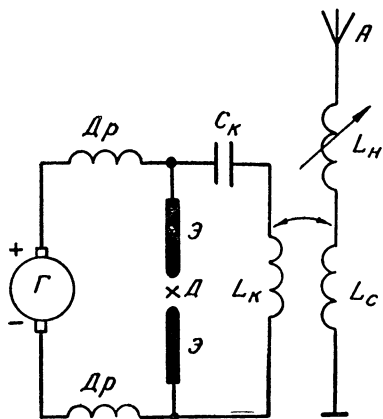


Рис. 6. Схема дугового генератора первых радиотелеграфных станций:

Г — машинный генератор постоянного напряжения; Др — катушки индуктивности; Э — угольные электроды; Д — электрический дуговой разряд (дуга); С_к и Л_к — конденсатор и катушка индуктивности избирательного колебательного контура; Л_с — катушка индуктивной связи антенны А с силовым колебательным контуром; Л_н — катушка индуктивности для настройки антенны

удавалось возбуждать незатухающие колебания в контуре дуга — конденсатор С_к и индуктивность Л_к благодаря отрицательному нелинейному сопротивлению электрической дуги*.

Частота генерируемых колебаний в таком устройстве равна частоте собственных колебаний электрического контура, определяемого емкостью конденсатора С_к и индуктивностью Л_к.

Дуговые передатчики из-за ряда недостатков (низкий коэффициент полезного действия, большой уровень помех и др.) вскоре были заменены передатчиками с высокочастотными машинными генераторами-альтернаторами (рис. 7). Они, в

свою очередь, после изобретения и совершенствования радиоламп уступили место ламповым генераторам (1913—1916), которые являются генераторами незатухающих колебаний и удовлетворяют многообразные требования современной радиотехники. Если в дуговом передатчике конденсатор С использовался для настройки контура на определенную частоту, то в передатчике с машинным генератором конденсатор С₁ выполняет новую функцию — компенсирует реактивную мощность ферромагнитного умножителя частоты (см. рис. 7).

* Электрическая дуга, открытая в 1802 году русским ученым В. В. Петровым, используется для сварки и плавки металлов, в мощных источниках света — прожекторах. Отрицательное сопротивление, проявляющееся как уменьшение падения напряжения на дуге при росте тока, объясняется увеличением количества носителей зарядов — ионов в дуге при увеличении тока. Нелинейность дуги обнаруживает себя в непропорциональном изменении этих величин.

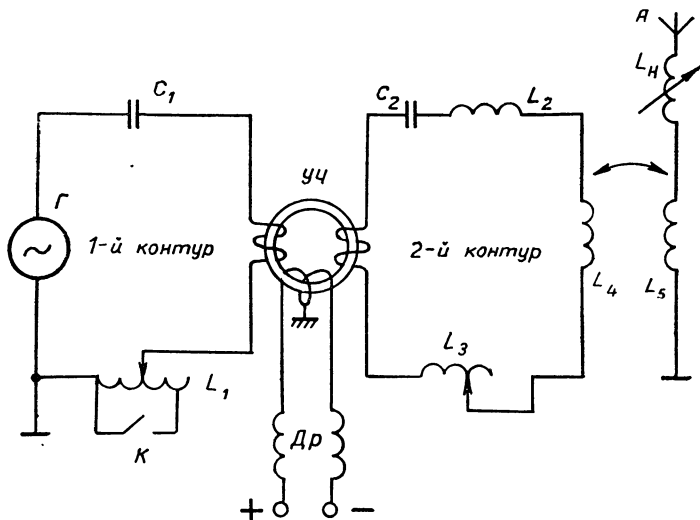


Рис. 7. Схема радиопередатчика с машиной высокой частоты В. П. Вологодина:

Γ — машинный генератор высокой частоты; K — телеграфный ключ; C_1 и C_2 — конденсаторы для компенсации реактивной мощности; L_1 , L_2 и L_3 — катушки индуктивности; L_4 и L_5 — катушки индуктивности связи с антенной; L_h — катушка индуктивности для настройки антенны; A — антенна; Dr — высокочастотные заградительные дроссели; $УЧ$ — умножитель частоты

В период доламповой радиотехники возможно было применение только телеграфного принципа передачи информации, т. е. сообщения передавались с помощью различных наборов (кодов) импульсов. Для этого работой (мощностью или частотой) искровых, а затем дуговых генераторов оператор управлял с помощью телеграфного ключа. В приемном аппарате сигналы из антенны поступали в детектор, заменивший когерер. Детектор* управлял работой реле, которое, в свою очередь, управляло простейшим печатающим сигналами аппаратом, основанным на использовании электромагнита.

Бурное развитие радиосвязи, в основном для военноморского флота, уже в начале XX века вызвало необхо-

* Детектором вначале (1905) служила платиновая проволока в электролите. Год — два спустя всеобщее распространение получил предложенный в разных вариантах кристаллический полупроводниковый детектор (первое применение твердых полупроводников!).

димось промышленного производства конденсаторов, изготовлявшихся ранее кустарным способом.

Для генераторов передатчиков требовались высоко-частотные (на частоту в десятки и сотни тысяч герц) так называемые контурные конденсаторы. Они должны были иметь малые потери энергии, выдерживать высокие напряжения и большие переменные токи. Для этих целей был разработан быстро ставший основным видом конденсатор с диэлектриком в виде пластинок из минеральной слюды, обладавшей высокой электрической прочностью и низкими потерями.

Для точной настройки антенны на частоту передающей радиостанции разрабатываются различные конструкции воздушных конденсаторов переменной емкости.

В 1900 году был выдан патент на производство бумажных конденсаторов с напрессованными на бумажную ленту обкладками из тончайшей по тем временам фольги, состоящей из олова (толщиной около одной тысячной доли миллиметра). Впоследствии эта конструкция преобразовалась в металлизированные конденсаторы.

Действительно широкая практическая необходимость в конденсаторах различных видов, емкостей и назначений возникает в эпоху ламповой радиотехники и электроники, особенно после создания в 1904 году Джоном Амброзом Флемингом двухэлектродной лампы — диода, прекрасно выпрямлявшего переменный ток, и в 1906 году американским ученым-изобретателем Ли де Форестом трехэлектродной лампы — триода (аудиона, как его тогда называли), способного усиливать слабые электрические колебания, подаваемые на его сетку.

С изобретением триода, а затем и многоэлектродных ламп человечество получило возможность управлять электрическими сигналами по любому закону, усиливать их до нужной величины. На основе электронных ламп появилась возможность создавать компактные, долговечные ламповые генераторы незатухающих колебаний для радиопередатчиков, мощность которых управлялась бесконтактным путем с помощью электрических сигналов от микрофона: «В 1910 году де Форест провел первую в истории музыкальную радиопередачу из театра «Метрополитен Хауз», где давалась опера с участием Карузо. Тогда же он начал ежедневные музы-

кальные передачи, которые слушало все возрастающее число радиолюбителей». До этого речь и музыка могли передаваться на дальние расстояния с помощью только проводной связи.

Электронные лампы позволили также более эффективно использовать радиотелеграф, так как с их помощью можно было осуществлять прерывистую (в соответствии с кодом передачи) генерацию сигналов одной стабильной частоты.

Решающее значение приобрело изобретение электронных ламп для совершенствования радиоприемников. Диод Флеминга заменил все несовершенные детекторы* электромагнитных волн. Появились усилители и генераторы высокочастотных и низкочастотных сигналов. Для них потребовались конденсаторы различного назначения (фильтровые, контурные, разделительные, блокирующие и т. д.), как на высокие частоты и напряжения, так и на низкие. Это обусловило расширение материалов, используемых при разработке конденсаторов, а также существенное разнообразие их конструкций. В частности, для получения конденсаторов большой емкости низкого напряжения начинает широко применяться конструкция намотанного спиралью ленточного бумажного конденсатора**.

Создаются первые образцы жидкостных электролитических конденсаторов, обладающих при одинаковом объеме существенно большей, чем бумажные, емкостью благодаря большой площади и малой толщине диэлектрика.

В этих конденсаторах одной из обкладок служит алюминиевая фольга. Из-за электрохимического травления увеличивается площадь ее поверхности, при этом создается тонкий слой диэлектрика — окиси алюминия, обладающий высокой электрической прочностью (до 1000 вольт на микрометр). Второй обкладкой является жидкий электролит, контактирующий с диэлектриком.

* Слово детектор происходит от английского to detect — обнаруживать, т. е. детектор — «обнаружитель», в частности электромагнитных волн.

** Благодаря низкой стоимости и удовлетворительным качествам бумажные конденсаторы с пропиткой парафином и другими различными воскообразными веществами, а также жидкостями оказались наряду со слюдяными конденсаторами самыми долгоживущими — они выпускаются и применяются уже около 100 лет.

Недостаток электролитических конденсаторов такой конструкции — это их полярность, т. е. они допускают работу только при определенном знаке напряжения на его обкладках, а также большая величина потерь энергии при воздействии переменного напряжения.

Расширяется производство стеклянных конденсаторов и с бумажным диэлектриком, пропитанным бакелитом, шеллаком.

Главным качественным сдвигом в развитии конденсатора явилось создание в начале XX века специализированных предприятий для производства конденсаторов. Происходит и довольно четкое разделение конденсаторов на основные группы, сохранившиеся и в наши дни (см. таблицу).

Как в электротехнических, так и в радиотехнических устройствах выделяются сильноточные (или силовые) и слаботочные конденсаторы. Делятся конденсаторы и по областям применения: телефонные, радиоконденсаторы, электроэнергетические и т. д.

Исследования и разработки в области радиотехники во время первой мировой войны велись быстрыми темпами и в обстановке секретности. Аудион де Фореста усовершенствовался, ему находили все новые применения.

Из физики, вернее из ее области — электротехники, постепенно, и в основном в эти годы, выделилась новая прикладная наука — электроника. Огромным стимулом для ее развития послужили потребности военной электроники, а вскоре после окончания первой мировой войны и бытовой электроники, в основном производства радиоприемников и систем проводного вещания для миллионов жителей планеты. Расширялись и системы проводной связи — телеграфа и телефона. Для обеспечения большей дальности передач постоянно росла мощность передающих радиостанций*.

* В 1922 году в Москве под руководством М. А. Бонч-Бруевича был построен первый радиовещательный радиопередатчик мощностью в 12 кВт для радиостанции им. Коминтерна. В Нью-Йорке в это время работал радиопередатчик мощностью 1,5 кВт, в Париже и Кёнигс-Вустерхаузене (Германия) — по 5 кВт. В 1927 году в Москве у радиостанции «Новый Коминтерн» мощность уже достигала 40 кВт, в 1929 году мощность радиостанции ВЦСПС составляла 100 кВт, а в 1933 году — 500 кВт.

Схемы радиопередатчиков и приемников стремительно множились и усложнялись (рис. 8). Число конденсаторов в них росло, расширялись их функции. Для усилителей низкой частоты радиоприемников необходимы были конденсаторы на низкое (сотни вольт) напряжение небольшой емкости (доли микрофарады).

Для мощных усилителей низкой частоты — модуляторов передатчиков — требовались конденсаторы несколько большей емкости на более высокое напряжение (до нескольких тысяч вольт). Такие конденсаторы должны были иметь высокую электрическую прочность и большое сопротивление изоляции, что обеспечивалось диэлектриком из многослойной, хорошо высушенной

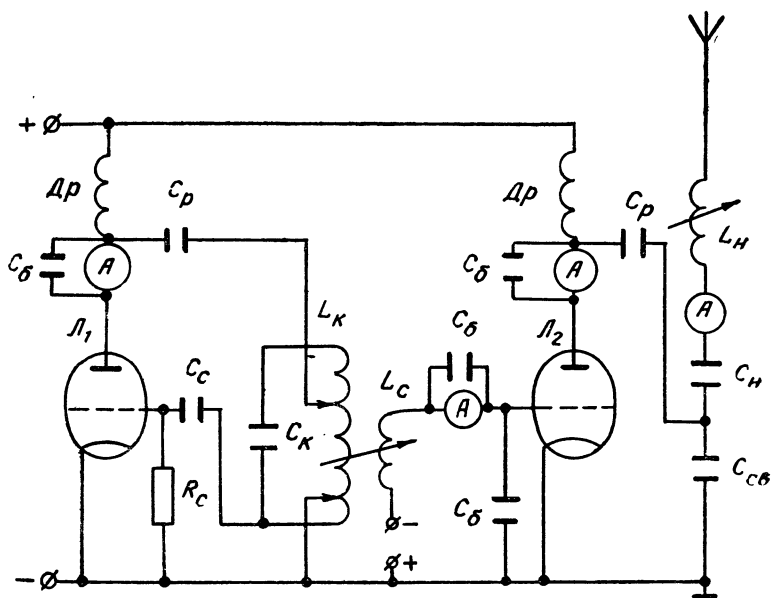


Рис. 8. Схема лампового радиопередатчика Нижегородской радиолaborатории:

L_1 и L_2 — электронные лампы 1-го и 2-го каскадов; L_k — катушка индуктивности контура задающего генератора; L_c — катушка индуктивности контура сетки лампы мощного каскада; L_n — катушка индуктивности настройки антенного контура; $C_б$ — блокировочный конденсатор; C_c — разделительный сеточный конденсатор; C_p — разделительный анодный конденсатор; C_k — конденсатор контура задающего генератора; C_n — конденсатор для настройки антенны; Dp — заградительные дроссели; R_c — сеточные сопротивления; $C_{св}$ — конденсатор связи

Развитие конденсаторов и расширение областей их применения

Основные этапы развития радиотехники и электроники, стимулировавшие развитие конденсаторов	2	3	4
1			
1900—1910 гг.			
Развитие радиотелеграфа (искровых, дуговых передатчиков). Применение радиотелеграфа на флоте. Изобретение электронных ламп (диода 1904 г., триода 1906 г.).	Создание и применение силовых контурных бумажных и слюдяных конденсаторов. Исследования жидкостных электролитических конденсаторов.	Становление электроэнергетики переменного тока. Вытеснение трехфазной системой электроснабжения систем постоянного, одно-, двух- и четырехфазного переменного тока.	—
1910—1920 гг.			
Становление ламповой передающей радиотехники. Широкое применение искровых, дуговых и электромагнитных радиопередатчиков. Оснащение военных флотов и армий радиоаппаратурой. Изобретение лампового генератора (1913 г.). Изобретение супергетеродина (1918 г.).	Широкое использование конденсаторов в колебательных контурах, ферромагнитных преобразователях частоты. Совершенствование конструкций слюдяных конденсаторов. Разработка жидкостных алюминиевых конденсаторов, конденсаторов переменной емкости. Образование специализированных конденсаторных производств.	Увеличение энергосмкости предприятий. Появление крупных районных электросетей. Широкое распространение трехфазной системы электроснабжения. Появление первых систем индукционного нагрева.	Применение конденсаторов для компенсации реактивной мощности.

1920—1930 гг.

Развитие ламповой приемной техники, дальнейший рост диосвязи, измерительной техники, многоканальной проводной связи. Разработка супергетеродина радиоприемников. Становление радиовещания.	Производство высоковольтных конденсаторов. Создание бумажных конденсаторов с твердой и жидкой пропиткой, образцовых и эталонных слюдяных, воздушных, высоковольтных газонаполненных конденсаторов. Разработка и производство конденсаторов в соответствии с функциональным назначением.	Широкое внедрение электрометаллургии, электролиза. Развитие ионной техники, электрифицированного рельсового транспорта.	Начало массового производства конденсаторов для повышения коэффициента мощности. Применение конденсаторов для продольной и поперечной компенсации реактивной мощности на низком и среднем напряжениях. Создание первых пленочных силовых конденсаторов.
--	---	---	---

1930—1940 гг.

Освоение коротких и ультракоротких волн. Развитие работ в области сверхвысоких частот. Зарождение радиолокационной и радионавигационной техники. Создание средств электронной телевизионной техники. Применение электроны в автоматике, промышленности, научных исследованиях.	Создание сухих поларных и неполярных электролитических, высокочастотных керамических, жидкостных, серных, импульсных бумажно-масляных, вакуумных, газонаполненных под давлением конденсаторов. Появление первых лаконочных (фольговых и металлизированных серебряном), полистирольных конденсаторов.	Увеличение мощности и протяженности линий электропередач. Создание объединенных энергосистем. Применение высокочастотной связи по проводам ЛЭП. Широкое развитие научных исследований в электротехнике, энергетике, автоматике. Развитие электротехнологии повышенных и	Применение хлорированных дефинилов, алюминиевой фольги в конденсаторостроении. Создание бумажно-масляных конденсаторов большой мощности с воздушным и водяным охлаждением. Разработка фарфоровых и бумажно-масляных конденсаторов связи. Широкое использование конденсаторов для компенсации реактивной мощ-
--	--	---	--

1	2	3	4
Расцвет ламповой электронной техники. Бурное развитие радио-локационной техники, высокочастотной связи по проводам, электронных измерительных приборов. Широкое внедрение методов радиоэлектроники во все отрасли науки и техники. Создание аналоговых и цифровых вычислительных машин. Ужесточение требований к влагостойкости и стабильности конденсаторов. Создание полупроводниковых триодов (1948 г.).	Бурный рост конденсаторостроения. Организация в СССР специализированных конденсаторных заводов. Создание импульсных малоиндуктивных конденсаторов, герметичных конструкций слюдяных, бумажных, металлобумажных, высококачественных высоковольтных керамических, полистирольных, кварцевых и полиэтиленовых конденсаторов. Серийный выпуск полистирольных, жидкостных, вакуумных конденсаторов постоянной и переменной емкости.	высоких частот (индукционного и диэлектрического нагрева).	ности электроустановок, промышленных предприятий и сетей. Создание мощных высоковольтных импульсных конденсаторов и генераторов на их основе для испытательных и рентгеновских установок.
		Укрупнение объединенных энергосистем. Рост напряжения и мощностей в энергосистемах, доли потребления энергии на постоянном токе. Широкое внедрение электрифицированного железнодорожного транспорта. Развитие исследований в области атомной физики и энергетики.	Создание и широкое использование конденсаторных батарей для централизованной компенсации реактивной мощности. Создание и применение бумажно-масляных высоковольтных фильтровых конденсаторов, сверхвысоковольтных конденсаторов связи, отбора мощностей. Создание мощных импульсных генераторов тока и напряжения для исследовательских и испытательных целей. Широкое использование конденсаторов для помехоподавления и защиты электроники.

1940—1950 гг.

трооборудования, пуска и работы однофазных асинхронных электродвигателей.

1950—1960 гг.

Развитие дискретной полупроводниковой электроники.	Создание и организация промышленного выпуска низковольтных малогабаритных обычных и морозостойчивых алюминиевых электролитических, жидкостных танталовых, малогабаритных металлобужающих, лакопленочных, полипропиленовых, поликарбонатных, лавсановых, оксидно-полупроводниковых, фторопластовых, стеклоэмалевых, стеклокерамических, нелинейных с сегнетоэлектрическим диэлектриком, керамических с барьерным слоем конденсаторов, конденсаторов с комбинированным бумажно-плёночным и слюдобумажным диэлектриком.	Создание первых атомных электростанций, силовых управляемых полупроводниковых вентилей — тиристоров. Развитие гидроэнергетики и дальних линий электропередач высоковольтного и сверхвысокого напряжения. Широкое внедрение систем передачи энергии постоянным током с ионными преобразователями.	Начало исследований по влиянию проникающих излучений на конденсаторы.
Бурное развитие ракетной техники, военной электроники, вычислительной и управляющей техники.	Широкое распространение бытовой электроники.	Разработка высоковольтных маломощных импульсных конденсаторов большой энергии и создание на их основе мощных импульсных установок для исследований физики ядра и плазмы.	Разработка высоковольтных маломощных импульсных конденсаторов большой энергии и создание на их основе мощных импульсных установок для исследований физики ядра и плазмы.
Ужесточение требований к конденсаторам по массогабаритным характеристикам, температурному диапазону, стабильности и долговечности.	Широкое применение металлизированных алюминиевых обкладок.	Появление бесконтактных среднечастотных систем электроснабжения специальных производств. Широкое применение импульсных устройств в промышленности (для сварки, намагничивания, рентгенодиагностических установок).	Широкое использование сверхвысоковольтных батарей для продольной компенсации индуктивного сопротивления линий электропередач и поперечной компенсации реактивной мощности в узлах энергосистем.

1	2	3	4
Становление микроэлектронной интегральной и гибридной техники. Бурное развитие космической, транспортной, медицинской, бытовой электроники, оптических квантовых генераторов (лазеров), систем цветного телевидения и видеозаписи. Разнообразие режимов работы и ужесточение требований к конденсаторам (расширение диапазона рабочих температур, давлений, вибраций).	Создание технологий производства интегральных и дискретных микроконденсаторов. Разработка конденсаторов повышенной надежности, бумажно-пленочных и пленочных накопительных конденсаторов повышенной энергоемкости, бескорпусных многослойных керамических конденсаторов. Широкое использование синтетических пленок для производства конденсаторов. Создание пожаро- и взрывобезопасных конструкций конденсаторов. Применение импульсных конденсаторов в электронных системах зажигания.	Развитие исследований в области термоядерной энергетики.	ты с водяным охлаждением.
Бурное развитие силовой полупроводниковой техники, атомной энергетики. Широкое применение индукционного нагрева на частоте промышленного тока. Разработка устройств электромагнитного перемешивания и транспортировки стали, устройств импульсной электротехнологии (электронской, магнитной обработки металлов).	Создание технологий производства конденсаторов для люминесцентного освещения, однофазных асинхронных электродвигателей, полупроводниковых преобразовательных устройств, в том числе непропитанных низковольтных пленочных конденсаторов.	Широкое применение конденсаторов для компенсации реактивной мощности промышленных предприятий. Разработка силовых бу- мажно-полипропиленовых конденсаторов с пропиткой хлорированными дефинилами, силовых пленочных конденсаторов с металлизированными обкладками. Создание специализированных конденсаторов для люминесцентного освещения, однофазных асинхронных электродвигателей, полупроводниковых преобразовательных устройств, в том числе непропитанных низковольтных пленочных конденсаторов.	Широкое применение компактных конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности промышленных предприятий. Разработка силовых бу- мажно-полипропиленовых конденсаторов с пропиткой хлорированными дефинилами, силовых пленочных конденсаторов с металлизированными обкладками. Создание специализированных конденсаторов для люминесцентного освещения, однофазных асинхронных электродвигателей, полупроводниковых преобразовательных устройств, в том числе непропитанных низковольтных пленочных конденсаторов.

1960—1970 гг.

Бурное развитие микро-электронной техники. Широкое применение импульсных стабилизаторов постоянного напряжения. Увеличение мощности, тока, напряжения и рабочих частот дискретных полупроводниковых приборов.	Разработка специальных конструкций электродитических конденсаторов с низкими значениями паразитных параметров, пленочных металлизированных конденсаторов большой емкости низкого напряжения. Создание конденсаторов для автоматического монтажа, накопителей энергии емкостью единицы — десятки фарад, сверхминиатюрных керамических конденсаторов большой удельной емкости. Замена дефицитных материалов (благородных металлов) на менее дефицитные. Постепенное сокращение выпуска бумажных конденсаторов, вытеснение их пленочными. Совершенствование конструкций пожаро- и взрывобезопасных конденсаторов.	Широкое применение силовых полупроводниковых устройств для вторичных источников питания; мощного электропривода, новых источников энергии, систем передачи энергии постоянным током на большие расстояния и асинхронной связи энергосистем, статических бесконтактных источников и регуляторов реактивной мощности.	Расширение конструктивных исполнений конденсаторов для силовых полупроводниковых устройств. Широкое использование силовых бумажно-полипропиленовых и пленочных конденсаторов на промышленной и повышенной частотах. Из экологических соображений в Японии, Швеции, Италии, Англии, США запрещено применение в конденсаторах хлорированных дефинилов.
---	--	---	--

1	2	3	4
Дальнейшее развитие микроэлектронной техники: — увеличение степени интеграции; — расширение диапазона рабочих частот; — создание силовых интегральных элементов. Внедрение систем связи на волоконной оптике. Дальнейшее развитие промышленной и бытовой электроники.	<i>1980—1990 гг.</i> Создание многослойных керамических конденсаторов большой емкости. Создание и использование конденсаторов со сложными двойными и тройными диэлектриками. Широкое применение для диэлектрических систем конденсаторов редкоземельных элементов. Создание высокочастотных оксидных конденсаторов большой емкости. Создание импульсных керамических конденсаторов для высоких частот повторения.	<i>(прогноз)</i> Увеличение мощности, напряжения в электроэнергетике. Применение мощных преобразовательных устройств для электропривода в энергетике. Повышение частот преобразователей большой мощности до сотен тысяч герц. Широкое использование фильтрокомпенсирующих устройств и статических быстродействующих компенсаторов реактивной мощности. Широкое применение автономного электрического транспорта. Развитие систем преобразования солнечной энергии, энергии ветра, волн, геотермальной и другой энергии в электрическую.	Разработка и широкое применение силовых пропитанных пленочных конденсаторов. Разработка импульсных керамических конденсаторов высокого напряжения и емкости. Использование сверхпроводников для тоководящих частей конструкций силовых конденсаторов высоких частот. Разработка нелинейных силовых конденсаторов с электрически управляемой емкостью. Разработка новых систем охлаждения конденсаторов. Разработка и широкое применение конденсаторов, использующих сверхтонкие слои диэлектрика и новые принципы накопления электрической энергии. Создание конденсаторов для работы в условиях сверхнизких и сверхвысоких температур.

бумаги, пропитанной различными веществами (воскообразными, жидкими).

В цепях питания постоянного тока для фильтрации напряжения нашли самое широкое применение электролитические конденсаторы.

В высокочастотных цепях радиоприемников и передатчиков требовались конденсаторы постоянной и переменной величин сравнительно небольшой емкости (сотни—десятки тысяч пикофард). Но если для радиоприемников это могли быть конденсаторы низкого напряжения, то для передатчиков необходимы были конденсаторы высокого напряжения и больших токов высокой частоты*. Кроме ставших уже традиционными слюдяных конденсаторов, обладающих исключительно высокими электрическими характеристиками, и воздушных конденсаторов разрабатываются герметичные вакуумные и наполненные воздухом и азотом с повышенным (до нескольких десятков атмосфер) давлением, а также керамические конденсаторы (из радиофарфора). Они оказались способными выдерживать весьма высокие напряжения (до нескольких десятков тысяч вольт), имели в ряде случаев меньшие габариты и потери энергии, чем слюдяные.

30—40-е годы нашего века характеризуются бурным развитием радиотехники. Освоение коротких, а затем ультракоротких волн и сверхвысоких частот вызвали к жизни такие новые области применения радиотехники, как радионавигация и радиопеленгация (ориентирование судов и самолетов, в частности, определение местонахождения в пространстве с помощью радиотехнических средств и методов), радиоастрономия (изучение космических объектов с помощью радиотехники), радиолокация (обнаружение и определение местонахождения различных объектов посредством облучения их радиоволнами и приема отраженных сигналов), телевидение (передача и прием изображений с помощью радиоволн).

В этот же период уже широко используются устройства для записи и воспроизведения звука, в основном

* В связи с увеличением количества радиостанций и необходимостью выделения для каждой из них определенной полосы частот довольно скоро диапазон длинных и средних волн был полностью заполнен. В связи с этим, а также для увеличения дальности и повышения качества приема уже в начале 30-х годов началось освоение коротковолнового диапазона.

в профессиональных целях, на радио и киностудиях. Электронные и радиотехнические устройства становятся незаменимыми орудиями научных исследований, прежде всего в области физики и в самой электронике. Совершенствуются методы и средства измерения. Количество схемных решений устройств электронной техники быстро увеличивается, от них требуется выполнение различных задач и функций.

Расширение области применения радиотехники и электроники вызвало широкое развитие производства элементной базы устройств — резисторов, радиоламп, конденсаторов и т. д. В разработке конденсаторов становятся главными снижение габаритов и повышение надежности.

В конце 20-х годов возникает качественно новое направление электроники — импульсная техника. Принцип действия устройств импульсной техники основывается на использовании нелинейных свойств электронных ламп, магнитных материалов и принципов обратных связей*. Для радиотелефонной связи использовались устройства, основной принцип действия которых базировался на применении линейных (пропорциональных) усилителей**. В радиотелеграфе, правда, применялся принцип импульсного кодирования сигналов. Однако в этих случаях получались радиоимпульсы, т. е. «пачки» радиоволн синусоидальной формы.

Радиолокационные устройства, аппаратура телевидения, автоматического управления и регулирования требовали различные по форме, величине напряжения, длительности, скоростям нарастания и спада импульсные токи и напряжения, так называемые видеоимпульсы.

Одним из основных элементов в импульсных схемах стал конденсатор, где использовалось его свойство быстро накапливать и отдавать энергию. В связи с этим конденсаторы должны были обладать малыми собственными индуктивностями, выдерживать кратковременные токи большой амплитуды, высокие напряжения и т. д. В результате среди силовых конденсаторов образова-

* В 1974 году Верховный суд США объявил, что изобретателем обратной связи является Ли де Форест.

** Нелинейность использовалась при детектировании (выделении) низкочастотных сигналов) и при стабилизации амплитуды колебаний в генераторах.

лась большая специализированная группа — импульсные конденсаторы с особыми конструкциями выводов и других элементов. В маломощных импульсных устройствах с успехом продолжали применяться традиционные виды конденсаторов — обычно слюдяные или бумажные.

Высоковольтные импульсные конденсаторы начинают использоваться не только в радиолокационных установках, но и для импульсной электросварки, при которой сварка металлических деталей происходит в точке прохождения мощного импульса тока.

Для технологических целей в 30-е годы широко внедряются многие достижения радиотехники и электроники. Это стало возможным благодаря созданию все более мощных и высокочастотных радиоламп* и устройств. Были разработаны высокоэффективные установки высокочастотного нагрева, плавки, сварки, закалки металлов и других материалов, а затем высокочастотного нагрева диэлектрических материалов. Впервые применяется высокочастотный нагрев в медицинских целях. Обнаружили, что больные участки тела поглощают значительно больше электромагнитной энергии, чем здоровые. Для компенсации реактивной мощности индукционных установок понадобились конденсаторы большой мощности (на сотни тысяч вольт-ампер) и на частоты в сотни и тысячи герц. Образуется специальная группа электротермических конденсаторов — «печных», как их тогда называли.

В начале 30-х годов в СССР для электротермии разрабатываются конструкции мощных бумажных конденсаторов с жидкой пропиткой минеральным (нефтяным) маслом. Во время второй мировой войны развитие радиотехники, электроники, масштабов производства средств связи, радиолокации значительно возросло. Для устройств, применяемых в военных целях, характерно требование высокой надежности и тяжелых усло-

* Еще в 1919 году М. М. Бонч-Бруевич — руководитель Нижегородской радиолaborатории — предложил конструкцию мощной электронной лампы с охлаждаемым водой медным анодом. В конце 20 — начале 30-х годов появляются четырехэлектродные (тетроды), пятиэлектродные (пентоды) и радиолампы с большим числом электродов (гексоды, гептоды, октоды); затем — мощные разборные радиолампы, лампы для сверхвысоких частот — магнетроны, клистроны и др.

вий эксплуатации. Например, элементы приемопередатчика (лампы, резисторы, дроссели, конденсаторы и т. д.) радиолокационного взрывателя снарядов должны были выдерживать гигантскую силу от ускорения, возникающего при выстреле.

Самолетная радиоаппаратура должна была выдерживать большие перепады давлений и температур (от -60 до $+70$ и выше градусов). Для военно-морского флота требовалась аппаратура, стойкая к влаге.

Все эти требования учитывались разработчиками элементов. Создаются конденсаторы в герметичных металлических корпусах, способных длительно противостоять различным неблагоприятным внешним воздействиям.

Ведутся интенсивные исследования атомного ядра. Создается атомное, а затем термоядерное оружие. Ядерные исследования осуществляются с помощью различных ускорителей частиц, в источниках питания которых содержатся конденсаторы. Для осуществления реакций термоядерного синтеза используются токи большой амплитуды, достигающей многих сотен тысяч ампер, получаемых с помощью разряда батарей импульсных конденсаторов. В конце 50-х годов в СССР начинает работать первая атомная электростанция.

Конденсаторы, применяемые в аппаратуре и установках, подвергающихся радиационному облучению, должны были уже обладать новым качеством — радиационной стойкостью.

В 1948 году произошло событие, оказавшее громадное влияние на судьбу потомков лейденской банки: был изобретен кристаллический полупроводниковый триод, функциональный аналог изобретения Ли де Фореста. С этого времени начинает зарождаться и быстро развиваться новая область электроники — полупроводниковая.

Полупроводниковые диоды и триоды значительно меньше по размерам, чем электронные лампы, и для своей работы требуют более низких напряжений (единицы и десятки вольт вместо сотен вольт). В отличие от ламп полупроводниковые триоды того времени управляются током, а не напряжением, поэтому имеют существенно (в тысячи раз) более низкие входные сопротивления, чем лампы. Эти особенности обусловили

потребность в конденсаторах значительно большей емкости на низкие напряжения, чем для ламповых устройств.

Требовалось также уменьшение габаритов конденсаторов, которые даже в ламповых устройствах занимали много места. Для полупроводниковой электроники разрабатываются следующие виды конденсаторов: малогабаритные алюминиевые с пастообразным электролитом, танталовые жидкостные электролитические конденсаторы, а затем оксидно-полупроводниковые.

В оксидно-полупроводниковых конденсаторах — разновидность электролитических — диэлектрик представляет собой тонкий (сотые и десятые доли микрометра) слой окиси металла, образующийся на поверхности одной из обкладок с помощью электрохимической и термической обработок. Эта обкладка в конденсаторах большой емкости получается спеканием при высокой температуре тонкого порошка металлов тантала или ниобия, благодаря чему ее поверхность оказывается сильно развитой (получается так называемый объемно-пористый анод, т. е. положительный вывод конденсатора). Второй обкладкой служит слой твердого полупроводникового электролита (двуокиси марганца), нанесенного на диэлектрик, поверхность которого, в свою очередь, покрывается слоем графита и серебра, хорошо проводящим электрический ток. К этому слою припаивается вывод.

Были созданы также конструкции оксидно-полупроводниковых танталовых конденсаторов с анодом в виде проволоочки (конденсаторы малой емкости) и с травленной фольгой. Эти конденсаторы обладают меньшими потерями энергии и токами утечки, а главное — большей надежностью, чем алюминиевые электролитические, и поэтому, несмотря на более высокую стоимость, нашли широкое применение в различной электронной аппаратуре. Выпуск таких конденсаторов в мире очень скоро достиг многих миллионов и даже миллиардов штук в год. Электронная техника широко используется также в устройствах проводной связи для обеспечения дальней связи и улучшения ее качества. К конденсаторам, как и к другим элементам этих устройств, впервые в мировой практике были предъявлены очень высокие требования: надежность и долговечность — срок служ-

бы до ста лет и более. Особенно жестким это требование было в системах трансатлантической связи с помощью кабелей, прокладываемых по дну океана, поскольку стоимость этой прокладки и замена очень высокие, а усилители «вставлены» в кабель примерно через каждые 65 км*.

Мощный толчок совершенствованию конденсаторов был дан развитием средств электронной вычислительной техники. Электронные аналоговые вычислительные машины, создание которых началось в конце 30-х годов, а первые образцы появились в СССР уже во время Великой Отечественной войны (серии ламповых машин были выпущены в 1946—1947 годах), позволяют моделировать реальные процессы в различных областях науки и техники. Основным элементом интегратора такой машины является конденсатор, от стабильности емкости и сопротивления утечки изоляции которого зависит точность решения задач. Для таких машин потребовались высокостабильные конденсаторы с малой абсорбцией и большим сопротивлением утечки. Для этих целей первоначально использовались специальные конструкции бумажных конденсаторов, а затем были разработаны конденсаторы с синтетическим пленочным диэлектриком — полистиролом.

Параллельно аналоговым развивались цифровые вычислительные машины, первое поколение которых (1940—1956 годы) было ламповым, а второе (1956—1963) — на транзисторах. Число конденсаторов в них достигало десятков и сотен тысяч штук. Поэтому конденсаторы для электронно-вычислительных машин должны были быть миниатюрными и обладать высокой надежностью.

Переход от навесного монтажа ламповых машин к печатному в машинах второго поколения, обусловленный необходимостью серийного производства множества идентичных плат, повышения надежности монтажа и уменьшения габаритов устройств, потребовал разработки конструкций конденсаторов, приспособленных для

* Прокладка телеграфных кабелей между Америкой и Европой была начата уже в середине XIX века. С того времени проложили более двух десятков кабелей, часть из них в настоящее время уже не работает. Первый в мире трансатлантический телефонный кабель в двух направлениях проложен между США и Шотландией в 1955—1956 годах.

печатного монтажа. Были разработаны и широко стали использоваться электролитические конденсаторы с радиальными выводами и строго фиксированным расстоянием между ними. Встала задача создания конденсаторов для автоматического монтажа плат, и были выполнены разработки таких конденсаторов, закрепленных на ленте, подобно пулеметным патронам.

Разрешалась проблема уменьшения габаритов конденсаторов. В начале 50-х годов осваивается технология производства так называемых металлизированных конденсаторов с обкладками, которые напылялись в вакууме на диэлектрик (первоначально на бумаге, затем и синтетических пленках). Для этого использовались легкоплавкие цинк, олово и другие металлы. В последнее время широко применяется металлизация пленок алюминием. Малая толщина таких обкладок (сотые доли микрометра) обеспечила не только значительное (в 1,5—2 раза по сравнению с фольговыми для конденсаторов низкого напряжения) уменьшение габаритов, но придала конденсаторам уникальное свойство самовосстановления при пробоях (см. раздел 12).

Позднее появились конструкции лакопленочных конденсаторов. В них диэлектрик — очень тонкая (десятые доли — единицы микрометра) пленка лака, осаждающаяся либо на фольговые обкладки, либо на подложку, с которой она снимается, а затем металлизуется. Из получаемых таким образом лент наматывается секция.

Благодаря малой толщине диэлектрика и повышенной (по сравнению с бумагой и другими органическими диэлектриками) диэлектрической проницаемости лакопленочные конденсаторы имеют высокие удельные емкости, близкие к удельным емкостям электролитических конденсаторов на такие же напряжения, но обладают существенно большим сопротивлением изоляции, чем последние. Наиболее революционные сдвиги в конденсаторостроении обусловлены применением новых видов диэлектриков и соответственно новых технологий. В последнее десятилетие наиболее массовыми стали конденсаторы с диэлектриком из синтетических пленок, керамики и упоминавшиеся оксидно-полупроводниковые. Эти конденсаторы значительно большей емкости, при-

ходящейся на единицу объема с меньшими потерями энергии, более дешевые и долговечные.

Успехи химии полимеров открыли возможность получения тонких синтетических пленок самых разнообразных физико-химических свойств. Хотя многие пленки (полистирол, полиэтилен и др.) были известны давно, массовое производство конденсаторов на их основе началось только с начала 50-х годов благодаря освоению промышленного выпуска однородных, т. е. с малым количеством дефектов (проколов, пор, включений и т. д.) специальных конденсаторных пленок.

Довольно быстро образовалась новая группа — пленочные конденсаторы, получившие широкое применение раньше в устройствах связи, измерительных установках, а затем, по мере снижения стоимости пленок, и в других областях.

В настоящее время используются такие синтетические пленочные диэлектрики, как полипропилен, полиэтилентерефталат (лавсан), полистирол, поликарбонат, политетрафторэтилен (фторопласт). Постепенно, но все с большим успехом пленочные конденсаторы заменяют бумажные благодаря исключительно высоким электрическим свойствам высококачественных синтетических пленок.

В определенной мере современное состояние в развитии конденсаторов различных видов иллюстрируется на рис. 9. Переход в зону «старости» означает скорее уменьшение возможностей дальнейшего совершенствования конструкции и ее свойств. Разумеется, все показанные виды конденсаторов постоянно совершенствовались, некоторые даже «переживали» свое второе рождение.

«Долгожителями» являются бумажные и слюдяные конденсаторы. Но из-за дефицита природной слюды производство их постоянно сокращалось. Такие конденсаторы обладают очень хорошей стабильностью и малыми потерями энергии. В последнее время благодаря разработке способов получения искусственной слюды были созданы конструкции слюдобумажных конденсаторов, предназначенных для работы при повышенных (выше 100°C) температурах.

Второе рождение испытали также конденсаторы с

диэлектриком из стекла — прямые потомки лейденской банки.

Изготавливаются и стеклокерамические конденсаторы, имеющие более высокую удельную емкость, чем стеклянные.

Широко применяется в качестве диэлектрика керамика, на электрические свойства которой можно влиять путем изменения компонентов и их процентного содержания. Высокая диэлектрическая проницаемость, достигающая у некоторых видов керамики десятков и сотен тысяч единиц, позволила резко уменьшить габариты низковольтных конденсаторов. Разработаны низковольтные и высоковольтные керамические конденсаторы с малыми потерями, способные работать на высоких частотах и в импульсных режимах.

Немаловажными достоинствами керамических конденсаторов являются их низкая стоимость и сравнительно простая технология производства.

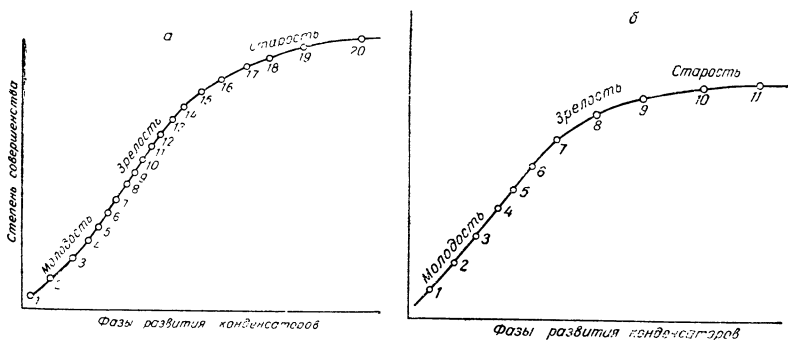


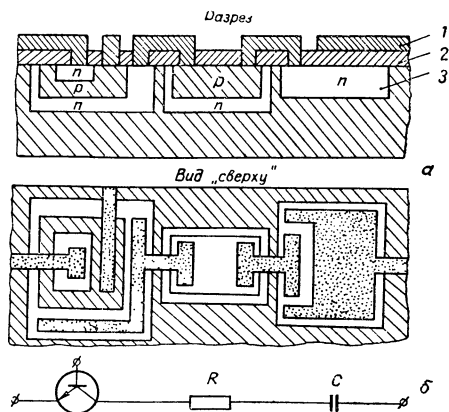
Рис. 9. Эволюционные «кривые жизни» конденсаторов:

а — слаботочных: 1 — ионисторы, конденсаторы с накоплением энергии в молекулярном слое; 2 — керамические с очень высокой диэлектрической проницаемостью; 3 — бескорпусные танталовые; 4 — стеклокерамические; 5 — многослойные керамические; 6 — стеклянные; 7 — керамические нелинейные; 8 — микроминиатюрные керамические подстроечные; 9 — оксидно-металлические; 10 — конденсаторы с комбинированным диэлектриком; 11 — пленочные намотанные металлизированные; 12 — пленочные намотанные фольговые; 13 — алюминиевые электролитические; 14 — танталовые жидкостные; 15 — керамические однослойные; 16 — слюдяные; 17 — бумажные; 18 — газонаполненные; 19 — вакуумные; 20 — воздушные переменной емкости;

б — сильноточных: 1 — керамические нелинейные; 2 — слюдобумажные; 3 — конденсаторы с комбинированным пленочным диэлектриком; 4 — пленочные металлизированные; 5 — пленочные фольговые; 6 — комбинированные бумажно-пленочные; 7 — керамические; 8 — слюдяные; 9 — металлобумажные; 10 — бумажно-фольговые; 11 — конденсаторы с жидким диэлектриком

Импульсный режим работы конденсаторов в электронных вычислительных машинах на высоких частотах потребовал разработки конденсаторов с малой собственной индуктивностью. В блоках питания, стабилизаторы которых были переведены в импульсный режим для повышения коэффициента полезного действия, также требовались конденсаторы большой емкости с низкой индуктивностью и потерями. Они были разработаны на основе «бисквитной» конструкции или конструкции типа «книга». В таких конденсаторах используются чередующиеся слои диэлектрика и широких обкладок, образующие контактные узлы большой площади.

Однако подлинно революционное воздействие на конденсаторы для вычислительных устройств оказал переход полупроводниковой техники на микроэлектронику. Технология напыления пленок оказалась плодотворной для микроэлектронной техники, где конденсаторы, как и другие элементы схем (резисторы, транзисторы, диоды и т. д.), образуются путем последовательного нанесения тонких слоев различных материалов на подложку. Получаемый таким путем конденсатор уже



Р и с. 10. Интегральные элементы, получаемые с помощью планарной технологии:

1 — слой металлизации (обкладка); 2 — слой двуокиси кремния (диэлектрик); 3 — вторая обкладка. Схематический разрез (а) и его принципиальная электрическая схема (б)

нельзя выделить как дискретный (отдельный) элемент, он является неотъемлемой частью интегральной схемы (рис. 10).

Микроэлектронная техника обусловила и дальнейшее снижение габаритов дискретных конденсаторов, которые продолжали использоваться в источниках питания, в цепях развязки. Зачастую блок питания микроэлектронного устройства занимает большую часть объема этого устройства.

Разрабатываются специальные типы малоиндуктивных электролитических и пленочных конденсаторов большой емкости (тысячи и десятки тысяч микрофард у электролитических и сотни микрофард у пленочных конденсаторов). Уменьшение размеров пленочных конденсаторов обеспечено за счет применения тонких пленок (1—3,5 микронметра), а также металлизированных обкладок, которые ранее с большим успехом применялись для бумажных конденсаторов.

К частотным характеристикам, температурной и временной стабильности, долговечности и безотказности дискретных конденсаторов электронной аппаратуры предъявляются жесткие требования.

В подавляющем большинстве нужные характеристики конденсаторов достигаются высоким качеством исходных материалов и совершенной технологией, нередко также и благодаря удачной конструкции. В качестве примера можно привести разработанные в 60-е годы и получившие широкое применение в 70-х годах многослойные керамические (фарфоровые) конденсаторы, обладающие очень маленькой индуктивностью при довольно больших значениях емкости (до нескольких микрофард). Значительное улучшение характеристик конденсаторов — накопление зарядов — достигалось новыми принципами. В конце 50-х годов были созданы керамические конденсаторы с барьерной емкостью, в которых заряды накапливаются на границе раздела — запорном слое. Отличительная особенность таких конденсаторов — очень большая емкость на единицу поверхности (до 0,5 мкФ/см²).

Возможности создания конструкций конденсаторов с требуемыми характеристиками постоянно расширяются и за счет применения разнообразных материалов, в

основном окислов титана, стронция, редкоземельных элементов и др.

Огромное влияние на развитие специальной электронной аппаратуры и соответственно ее элементов оказала ракетно-космическая техника, предъявившая очень жесткие требования, в частности, к конденсаторам. Большие абсолютные температуры и температурные перепады, радиационное облучение, сверхнизкое давление — далеко не полный перечень условий, в которых работает эта аппаратура. К конденсаторам ракетно-космической аппаратуры предъявляются требования минимальной массы и габаритов и высокой надежности.

Параллельно с развитием электроники, уже в 20-е годы распространившейся на такие области техники, как все виды связи, автоматика, управление и др., развивалась электроэнергетика. Самыми главными событиями и поворотным пунктом в электроэнергетике и электротехнике были изобретения: трансформатора в 1882 году И. Ф. Усагиным — механиком Московского университета, а затем трехфазного асинхронного двигателя и синхронного генератора переменного тока в 1890 году М. О. Доливо-Добровольским*. Это предопределило судьбу большой электроэнергетики. Уже в конце XIX века она начала превращаться из электротехники и энергетики постоянного тока в энергетику и электротехнику переменного тока.

Преимущества переменного тока — простота генерирования и преобразования величины напряжения, экономичность передачи на высоком напряжении, простота распределения электроэнергии и ее использования с помощью надежных и дешевых асинхронных двигателей — обусловили быстрый рост сторонников этой системы, хотя не обошлось и без курьезных выступлений против нее весьма авторитетных электротехников, в частности Эдисона.

Руководствуясь интересами фирмы, эксплуатировавшей системы постоянного тока, а возможно, находясь в плену собственных неправильных представлений о переменном электрическом токе, Эдисон утверждал, что

* М. О. Доливо-Добровольский (1869—1919) — выдающийся русский электротехник, основатель теории и техники трехфазного переменного тока.

использовать подземные кабели для передачи этого тока в городе все равно, что сидеть на пороховой бочке*. Но победили сторонники переменного тока, вернее сказать, победили правильные представления.

По мере развития электротехники и электроэнергетики увеличивалась мощность электростанций, обусловленная возрастающими потребностями промышленности в электроэнергии, особенно машиностроительной и металлургической (в частности производства алюминия). Росла протяженность линий электропередач (ЛЭП) и повышалось их напряжение с целью сокращения потерь энергии.

Широкое использование конденсаторов в электроэнергетике переменного тока началось в 20-х годах, когда их стали применять для повышения коэффициента мощности. Устанавливались батареи конденсаторов как на предприятиях, так и у отдельных потребителей. Это необходимо было для обеспечения нужного уровня напряжения, которое падало в интервалах больших нагрузок.

Началось серийное производство силовых конденсаторов. Увеличение длины ЛЭП и связанные с этим потери напряжения и энергии, снижение запаса устойчивости работы системы обусловили одно из важнейших применений конденсаторов для компенсации реактивного сопротивления ЛЭП и реактивной мощности промышленных предприятий. Характерно было то, что использовались не единичные конденсаторы, а батареи из тысяч и десятков тысяч их, т. е. осуществлялось централизованное генерирование реактивной мощности. Эти конденсаторы должны были обладать устойчивостью к значительным перенапряжениям — частому явлению в сетях, высокой надежностью.

Большие потребности в мощных батареях стимулировали развитие этой группы конденсаторов, укрупнение единичной их мощности, необходимое для уменьшения их числа в батарее.

Основной конструкцией силового конденсатора промышленной и повышенной частот, применяемых в электроэнергетических системах и электротехнических

* Несмотря на исключительную одаренность изобретателя (им было получено свыше 1000 патентов) теоретически Эдисон был слабо подготовленным электриком.

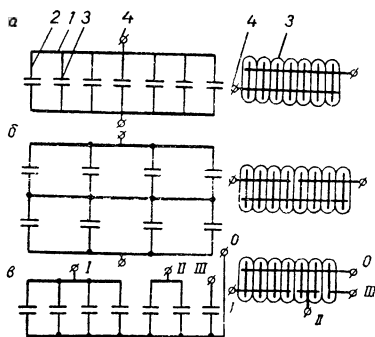


Рис. 11. Схематическое изображение внутренних соединений многосекционных конденсаторов: а — параллельное соединение секций (1 — сборные шины — перемычки; 2 — выводы секций; 3 — секции; 4 — выводы пакета секций); б — параллельно-последовательное соединение секций; в — схема внутренних соединений конденсаторов со ступенчато изменяемой емкостью (0 — общий вывод; I—III — групповые выводы)

установках, до самого последнего времени была и остается многосекционная конструкция с бумажным диэлектриком и фольговыми обкладками. Секции — отдельные конденсаторные элементы — соединяются в них последовательно (для работы при высоких напряжениях), параллельно (для получения большой емкости) или последовательно-параллельно (рис. 11).

Секции наматываются в виде рулонов из нескольких слоев диэлектрика и пары фольговых обкладок. Рулоны затем прессуются для придания им плоской формы и по-

мещаются в защитный (обычно металлический) корпус, от которого они отделяются несколькими слоями изолирующего материала (бумаги, картона, пленки и т. д.). Для улучшения теплоотвода и увеличения рабочей напряженности поля секции в корпусе пропитываются различными изолирующими жидкостями*.

После прогрева и вакуумной обработки конденсаторов пропитывающая жидкость хорошо заполняет зазоры между диэлектриком и обкладками пустоты и поры в диэлектрике. Этим достигается повышение напряжения развития частичных разрядов и соответственно более высокое рабочее напряжение.

Длительное время для пропитки использовались различные масла, а с 30-х годов — и хлорированные дифенилы. Последние обладают более высокой диэлектрической проницаемостью, чем масло и бумага, благодаря чему достигается значительное повышение удельной мощности конденсаторов. Хлордифенилы также

* Для напряжения ниже 400 В разработаны силовые малогабаритные непропитанные пленочные конденсаторы.

придают им свойство практически невосгораемых, однако, к сожалению, они токсичны.

Такие конденсаторы оказались достаточно дешевыми, технологичными и имели удовлетворительные энергетические и другие характеристики, благодаря чему и получили широкое распространение.

Однако развитие технологии производства синтетических пленок, превосходящих по электрическим характеристикам бумажный диэлектрик и обладающих более высокой однородностью, однозначно предопределило замену бумажного диэлектрика бумажно-пленочным для применения на частотах до нескольких сот герц. Этот процесс, начавшийся в 50-е годы, за рубежом практически завершен. У нас в стране бумажный диэлектрик длительное время являлся более дешевым материалом, но с 70-х годов произошла замена его на комбинированный, в основном бумажно-полипропиленовый диэлектрик.

Бумажно-пленочные силовые конденсаторы имеют меньшие потери энергии, большую долговечность и удельную мощность. Особенно эффективно использование бумажно-пленочных диэлектриков для электротермических конденсаторов, работающих на повышенных частотах, где в ряде случаев удается отказаться от водяного охлаждения.

Улучшение характеристик силовых конденсаторов возможно также при диэлектрике только из синтетических пленок. Хотя попытки разработать силовые пленочные конденсаторы предпринимаются давно*, еще не удавалось достичь нужного качества и стоимости пленок, а главное — из-за набухания пленок пленочные конденсаторы трудно хорошо пропитать**; и в оставшихся газовых включениях развиваются разряды, приводящие к быстрому выходу конденсаторов из строя.

Введение в практику электроэнергетики высококачественных систем связи по проводам высоковольтных ЛЭП, применяемых, в частности, для построения специальных видов защит, привело к созданию высоко-

* Первый чисто пленочный силовой конденсатор был разработан в Германии в 1926 году.

** Только по этой проблеме имеется несколько десятков различных технических рекомендаций, запатентованных, но не приведших к ее окончательному решению.

вольтных конденсаторов связи. Они имеют небольшую емкость (тысячи — десятки тысяч пикофард) и служат совместно с заградительными реакторами (катушками индуктивности) для отделения низковольтного сигнала высокой частоты от высокого напряжения промышленной частоты.

Близкими по конструкции и величинам емкости к конденсаторам связи являются конденсаторы для емкостных делителей напряжения, служащих, в частности, для измерений в высоковольтных цепях.

Другой специфической группой являются фильтровые конденсаторы, улучшающие формы напряжения или уменьшающие его пульсации в системах энергоснабжения электрического транспорта.

В технике высоких напряжений силовые конденсаторы применяются также в генераторах импульсов тока и напряжения, используемых для испытания различного оборудования, исследовательских целей и т. д. Они служат также для бестрансформаторного отбора мощности. Для них характерен довольно большой срок службы — до нескольких десятков лет, особенно для последовательных конденсаторов батарей централизованной компенсации реактивной мощности. К силовым конденсаторам предъявляются менее жесткие, учитывающие внешние воздействия (климатические, механические и т. д.), требования, чем к конденсаторам электронной техники.

И конструкции их не так разнообразны. Особенность силовых конденсаторов средних частот (от 100 до 20 000 Гц) — это применение водяного охлаждения, обязательного в случае бумажного диэлектрика, так как на повышенных частотах тепловыделение становится очень значительным.

Хотя пути развития (соответственно и требования, конструкции и т. п.) «электротехнических» конденсаторов и конденсаторов для электронной техники в начале XX века «разошлись», для них имеются близкие по условиям работы области применения, а также использование конструкций, характерных для одной группы в конденсаторах другой группы. Например, разработка и применение конденсаторов с металлизированными обкладками, ранее применявшихся в слаботочных цепях, для компенсации реактивной мощности потреби-

телей, пусковых и рабочих конденсаторов электродвигателей однофазного тока и т. д.

Ярким примером взаимной обусловленности и связи развития и совершенствования конденсаторов с появлением и развитием других элементов электрических устройств является силовая полупроводниковая техника. К этой отрасли электротехники относятся преобразовательные устройства для бесконтактного преобразования одного рода тока в другой, регулирования напряжения, мощности и тока.

Разработка и промышленное освоение выпуска кремниевых полупроводниковых вентилях (неуправляемых — диодов и управляемых — тиристоров) в 50-х годах нашего века обусловили разработку и широкое применение различных преобразовательных устройств: выпрямителей, инверторов, преобразователей частоты, регуляторов мощности и напряжения постоянного и переменного тока, различной коммутационной аппаратуры и т. д.

Высокое быстродействие и импульсный режим работы полупроводниковых вентилях в этих устройствах вызвали необходимость создания специальной группы конденсаторов, способных выдерживать большие импульсные токи и напряжения, следующие с повышенной частотой. За рубежом эта группа получила название «конденсаторы для энергетической электроники», которым подчеркивается их силовое назначение в режимах, характерных для электроники.

Наряду с положительными качествами силовые полупроводниковые устройства имеют недостатки: генерируют широкий спектр высших гармоник токов и напряжений, распространяющихся по сети и оказывающих вредное действие на другое оборудование. Эти устройства являются источником радиопомех. В связи с этим из-за роста числа и мощности преобразовательных установок все острее становится проблема фильтрации и подавления этих гармоник. В фильтрах, которые служат данным целям, основным элементом также служат конденсаторы. Используется их свойство уменьшать с частотой свое сопротивление. Главные требования, предъявляемые к фильтровым конденсаторам, — это способность работать при резко несинусоидальных токах и напряжениях и стабильность величины ёмкости.

Подавление радиопомех, возникающих в преобразователях и другом оборудовании, обеспечивается с помощью высокочастотных фильтров, в состав которых входят специальные (проходные, защитные и др.) конденсаторы, которые должны обеспечить низкое сопротивление высокочастотным составляющим токов.

Силовые полупроводниковые приборы, имеющие уникальные характеристики по мощности, которой они управляют, при достаточно малых размерах и других достоинствах оказались уязвимыми в отношении воздействий перенапряжений. Даже кратковременное их воздействие недопустимой величины приводит к катастрофическому выходу этих приборов из строя. Для подавления пиков перенапряжений в полупроводниковых устройствах широко применяются конденсаторы, поглощающие энергию, накопленную в индуктивных элементах, которая затем рассеивается в резисторах. Это так называемые демпфирующие конденсаторы, обладающие высокой устойчивостью к импульсным токам и надежностью.

Специфические требования предъявил к конденсаторам автомобильный, железнодорожный, морской, воздушный транспорт. Повышенные вибрации, удары, перепады температур, влажность — далеко не полный перечень тех условий, в которых работают конденсаторы на транспортных средствах. В некоторых случаях эти требования приводили в затруднение даже разработчиков космической техники.

Другим специфическим требованиям должны отвечать конденсаторы для работы во взрыво- и пожароопасных условиях, например в шахтах и других специальных производствах и т. д. Для этих условий разрабатываются конструкции специальных конденсаторов.

Все еще большая доля электронных и электротехнических устройств, содержащих конденсаторы, применяется в быту. Техника записи и воспроизведения первоначально звука, а затем изображения, служащая профессиональным, а в последнее время и любительским целям, стала неотъемлемой частью жизни человека. Нет нужды напоминать о роли электроприборов в повседневной жизни людей — это достаточно ярко проявляется при перерывах в электроснабжении.

Широкое применение однофазных электрических ма-

шин, в частности асинхронных двигателей малой мощности, в бытовых электроприборах (холодильниках, стиральных машинах, кондиционерах и др.) вызвало к жизни специальные, так называемые моторные конденсаторы, используемые для обеспечения пуска (увеличения пускового момента) и работы (создания рабочего момента) двигателя.

Другой большой областью применения конденсаторов, также породившей специальную их группу, являются системы люминесцентного освещения. В этих системах конденсаторы используются для обеспечения условий «пуска» ламп и компенсации реактивной мощности, потребляемой балластными дросселями или автотрансформаторами, которые обеспечивают стабильную работу лампы. По конструкции это малогабаритные силовые конденсаторы.

Различные устройства, включая электромагнитные сверхвысокочастотные печи для приготовления пищи* и кухонные ЭВМ для автоматического управления их режимами, вероятно, то наиболее значительное новшество, появившееся в быту за последнее десятилетие.

Все упомянутые приборы содержат значительное количество конденсаторов, которые должны длительно обеспечивать надежную и безопасную эксплуатацию этих приборов.

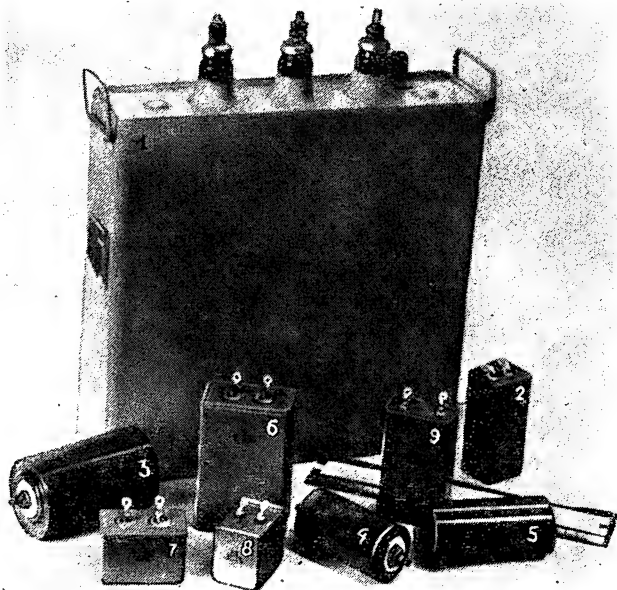
Понадобились конденсаторы и для плавучих автономных навигационных буев, для целей медицины — в дефибрилляторах (вспомните опыты на людях с лейденской банкой) и т. д.

Несмотря на многообразие конструкций конденсаторов, обусловленное условиями эксплуатации и соответствующими требованиями, по существу, устройство большинства из них такое же, как лейденской банки, т. е. между двумя металлическими электродами (обкладками) — диэлектрик. Конечно, по сравнению с лейденской банкой существенно изменились размеры и внешний вид конденсаторов (рис. 12). В качестве диэлектрика и обкладок используются различные материалы, отличающиеся свойствами и толщиной, которая у современных типов конденсаторов составляет от сотых долей до десятков микрометра.

* Продукты в таких печах обрабатываются от нескольких раз до десятков раз быстрее, равномерно, без потерь и т. д.

На развитие и совершенствование конденсаторов в последнее десятилетие влияет такая, казалось бы, далекая от электроники и электротехники общечеловеческая проблема, как защита окружающей среды. Эта проблема потребовала и запрещения применения в конденсаторах токсичных материалов. Так или иначе материалы конденсаторного производства (как и любого другого), попадая в окружающую среду, вызывают нежелательные последствия.

Указанное выше требование, в частности, обусловило отказ в ряде стран (Японии, Швеции, Англии, Италии и др.) от пропитки конденсаторов хлорированными дефинилами и замену их менее токсичными, способными быстрее биodeградировать, или совсем нетоксичными жидкостями.



Р и с. 12. Внешний вид силовых конденсаторов:

1 и 2 — крупногабаритный и малогабаритный электроэнергетические конденсаторы низкой частоты большой и малой мощности; 3 и 4 — среднечастотные малогабаритные пленочные конденсаторы большой мощности; 5—9 — низкочастотные силовые конденсаторы низкого напряжения малой мощности

Таким образом, путь развития конденсаторов, как и любого элемента электронных, электротехнических и электроэнергетических установок, предопределялся потребностями и спецификой областей применения, которые непрерывно расширялись и продолжают расширяться (см. таблицу).

Развитие телевидения, радиолокации обусловило создание импульсных конденсаторов. Затем они стали применяться в импульсной электротехнологии, ядерных исследованиях, импульсных источниках света, в оптических квантовых генераторах (лазерах) и даже в медицине. Каждая из этих областей вызвала модификацию конструктивных и номинальных данных конденсаторов.

Уже разработан конденсатор с высокой энергоемкостью, с использованием в качестве диэлектрика хорошо очищенной от примесей и ионов воды (вспомните лейденскую банку: там вода была обкладкой!).

История развития конструкций конденсаторов — это история освоения известных и синтезированных материалов. Можно с уверенностью сказать, что каждое появление нового синтетического материала, в частности пленок, сопровождается и будет сопровождаться попытками применения его в конденсаторах. То же можно сказать о технологии, вспомнив хотя бы о «перевороте» в электронной технике, который был связан с освоением и совершенствованием вакуумной технологии, технологии тонких пленок и т. д.

В области технологии изготовления конденсаторов заключены большие возможности. Очень редко, когда лучшее решение находилось быстро, сразу. К нему последовательно приближались через более сложные и менее эффективные решения, недостатки которых обнаруживались иногда много лет спустя благодаря опыту эксплуатации тех или иных конструкций.

Глава II

ЧТО ПРОИСХОДИТ В КОНДЕНСАТОРЕ?

4. Некоторые сведения о строении вещества

Чтобы понять один из главных процессов, происходящих в конденсаторе, — поляризацию, необходимо углубиться в микромир и вспомнить, что все вещества состоят из атомов, молекул или ионов. Положительный ион получается из атома, лишившегося части электронов. Отрицательный ион, наоборот, получается за счет присоединения к атому дополнительных электронов. Ионами также могут быть и группы атомов, потерявшие или присоединившие электроны.

Атомы имеют положительно заряженное ядро и отрицательную электронную оболочку. В целом атомы и молекулы электрически нейтральны, поскольку несут одинаковые положительные и отрицательные заряды.

Все вещества по своим электрическим свойствам делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики. Это деление определяется структурой атома: чем легче оторвать от него электрон и тем самым получить свободные заряды, образующие электрический ток в веществе, тем больше его электропроводность.

Все металлы — хорошие проводники, потому что в твердом состоянии представляют собой кристаллы, в узлах решетки которых расположены положительно заряженные ионы (атомы металла, лишившиеся электронов), а в промежутках между ними — большое число свободных электронов, так называемый «электронный газ». Именно наличие свободных электронов приводит к высокой электропроводности и теплопроводности металлов.

В диэлектриках, наоборот, свободные электроны практически отсутствуют, что обуславливает весьма низкую электропроводность.

Полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. При нуле

Кельвина (-273°C) в полупроводнике свободные электроны отсутствуют. Однако если полупроводник нагреть, облучить, осветить и т. д., то часть электронов, получив избыток энергии, станут свободными, а атомы, лишившиеся электронов, — положительными ионами. Образуются так называемые пары электрон — дырка, способные образовать электрический ток при наличии внешнего электрического поля. При этом дырка ведет себя как эквивалентный положительный заряд, хотя в перемещении участвуют электроны, как бы по эстафете заполняющие дырку. Наличие двух типов проводимостей (электронной и дырочной) приводит ко многим интересным свойствам полупроводников, обеспечивающим их широкое распространение в современной технике.

Электрические свойства вещества определяются не только особенностями строения атомов. Например, одни и те же атомы углерода могут образовывать диэлектрик (алмаз) и хороший проводник (графит). Эти вещества имеют различное строение кристаллической решетки.

Примеси и дефекты кристаллической решетки тоже сильно изменяют электрические свойства твердых тел, так как влияют на способность атомов терять или приобретать электрон*.

Электрический ток в веществе обусловлен перемещением зарядов (в металлах — свободных электронов). При перемещении заряды взаимодействуют (сталкиваются) с атомами вещества, отдавая им свою энергию, полученную от внешнего электрического поля. Этот процесс обмена энергией вызывает нагрев вещества и обуславливает электрическое сопротивление току.

В 1911 году голландский ученый Гейке Камерлинг-Оннес обнаружил, что при охлаждении до $4,2\text{ K}$ ($-268,8^{\circ}\text{C}$) сопротивление кольца из замороженной ртути внезапно, резким скачком упало до нуля — до значения, которое практически не может быть измерено. Так было открыто явление сверхпроводимости, ко-

* Дефекты кристаллической решетки (например, наличие вакансий — свободных от ионов узлов решетки) или примеси ионов других веществ в решетке могут сильно изменить электропроводность вещества благодаря повышенной подвижности ионов в такой решетке.

торое в 1930-х годах теоретически объяснил советский физик Л. Д. Ландау и лишь теперь начинает находить практическое использование (сверхпроводящие постоянные магниты для МГД-генераторов, обмотки специальных электрических двигателей и мощных генераторов и т. д.).

В условиях сверхпроводимости образуются электронные пары, которые могут перемещаться в веществе, не взаимодействуя с ним. В настоящее время ведутся работы по созданию высокотемпературных сверхпроводников, которые позволили бы избежать необходимости применения дорогостоящих холодильных установок.

Предполагают, что «металлический водород», полученный из «обычного» твердого водорода воздействием на него чрезвычайно высокого давления, может явиться высокотемпературным сверхпроводником, способным работать при температурах до нескольких сот градусов Кельвина. Большие надежды возлагаются также на полимерные сверхпроводники — органические соединения, в которых возможно существование электронных пар при «обычных» температурах. Не исключено, что в будущем сверхпроводники будут использованы и в высокочастотных конденсаторах для обкладок и выводов.

Очень хорошим проводником является плазма — особое состояние вещества, когда под действием высокой температуры происходит сильная, практически полная его ионизация. Обилие электрических зарядов, как положительных, так и отрицательных, обуславливает высокую электропроводность плазмы.

5. Поляризация и деполяризация диэлектрика

Допустим, что каким-либо образом воздушный конденсатор зарядили до напряжения U . Это значит, что на одной из его обкладок, имеющей больший потенциал, скопился положительный заряд q , а на другой — точно такой же, но отрицательный. Между обкладками существует электрическое поле, направленное от положительно заряженной обкладки к отрицательной.

Отношение величины заряда q к напряжению U называется статической емкостью конденсатора: $C = \frac{q}{U}$.

Емкость его определяется размерами обкладок, веществом, находящимся между ними, и расстоянием между ними. Так, для плоского воздушного конденсатора

$$C \approx \varepsilon_0 \frac{S}{d}.$$

Здесь $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная; S — площадь обкладок, м²; d — расстояние между обкладками, м.

Электрический ток в цепи, содержащей конденсатор, связан с перемещением зарядов и, следовательно, с изменением напряжения на обкладках. При синусоидальном напряжении на конденсаторе ток, протекающий через него, опережает по фазе напряжение на угол в 90 градусов.

Фарадей обнаружил, что емкость конденсатора увеличивается, если пространство между обкладками конденсатора вместо воздуха частично или полностью занять твердым или жидким изолирующим веществом — диэлектриком. Кратность увеличения емкости равна относительной диэлектрической постоянной (или диэлектрической проницаемости) этого вещества.

Причиной увеличения емкости является поляризация диэлектрика, т. е. изменение электрического состояния вещества под воздействием внешнего электрического поля, заключающееся в перемещении связанных зарядов диэлектрика на ограниченные расстояния.

Электрическое поле, образованное этими зарядами, направлено навстречу внешнему и ослабляет его. Таким образом, при той же величине заряда на обкладках напряжение между ними при наличии поляризующегося диэлектрика оказывается меньше, а емкость конденсатора больше.

Существуют вещества, у которых центр тяжести положительных зарядов (ядра) совпадает с центром тяжести отрицательных зарядов (электронной оболочки). Такие вещества называют неполярными, они имеют симметричные структуры молекул (рис. 13). Это прежде всего все одноатомные молекулы (инертные газы, пары металлов), а также химические соединения с симметричным расположением атомов.

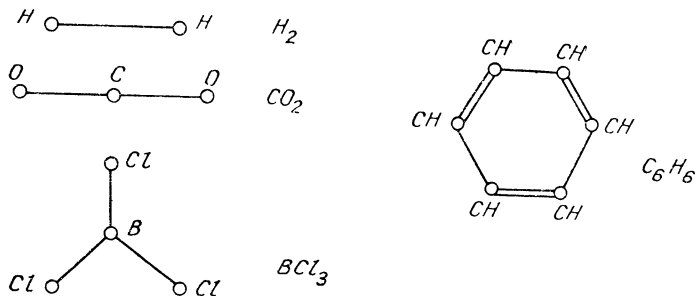


Рис. 13. Схема строения молекул неполярных веществ

В полярных веществах положительные и отрицательные заряды расположены асимметрично, атомы образуют так называемые диполи (рис. 14).

В неполярных диэлектриках наблюдается упругая поляризация, связанная со смещением электронных оболочек атомов и ионов относительно ядра (электронная поляризация; рис. 15,а); смещением атомов, образующих молекулу, у которых электронные оболочки несимметричны, — при образовании молекул они смещаются в сторону атома с более сильными связями (атомная поляризация); смещением друг относительно друга положительных и отрицательных ионов, образующих решетку ионных кристаллов (рис. 15,б).

Если внешнее электрическое поле в полярных диэлектриках отсутствует, то все диполи в любой момент времени в результате тепловых колебаний хаотично ори-

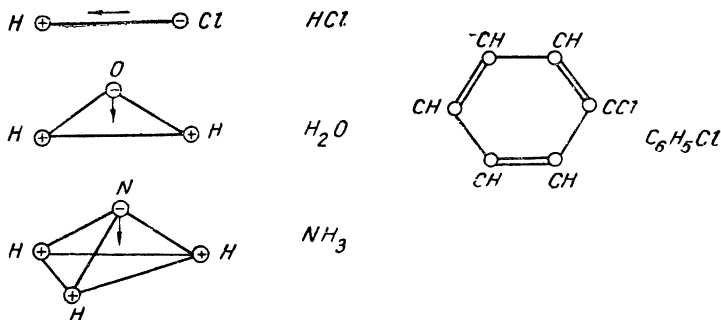
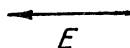
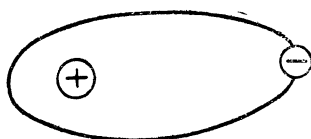
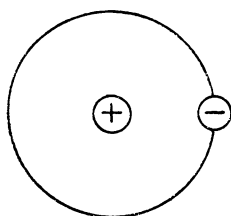


Рис. 14. Схема строения молекул полярных веществ

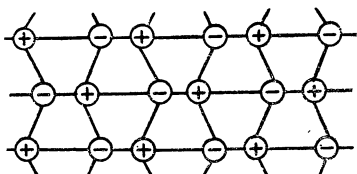
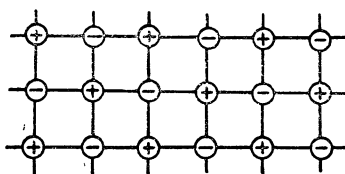
Поля нет

Поле наложено

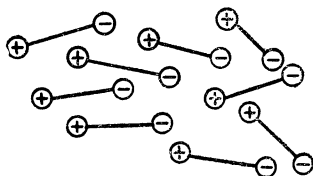
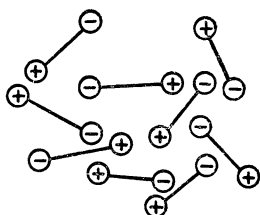
a



б



в



г

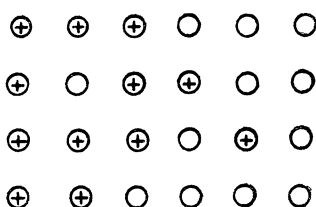
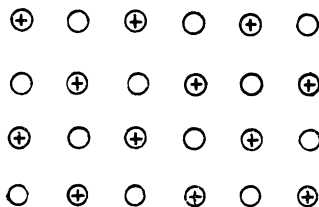


Рис. 15. Схематическое изображение явлений поляризации: электронной (*a*); ионной (*б*); дипольно-ориентационной (*в*); структурной (*г*)

ентированы в пространстве. При этом макроскопическое электрическое поле в среднем по объему вещества равно нулю. При воздействии внешнего электрического поля происходит частичная ориентация диполей по полю, что и является причиной поляризации (рис. 15,в). Процессу ориентации препятствует хаотичное тепловое колебание диполей.

В твердых телах с неоднородной структурой, а также при наличии примесей электроны, ионы или более крупные образования перемещаются в пределах отдельных включений под влиянием электрического поля. Такая поляризация называется структурной, или миграционной (рис. 15,г). Это она наблюдается, например, в материалах, абсорбирующих (поглощающих) влагу, в растительных клетках, неоднородных диэлектриках.

Кроме названных, наиболее часто встречающихся видов поляризации, имеются и другие виды: ионно-релаксационная (смещение слабосвязанных ионов на большие расстояния), электронно-релаксационная (обусловленная избыточными «дефектными» электронами или ионами), спонтанная (существует у группы твердых диэлектриков, называемых сегнетодиэлектриками) и т. д.

Поляризация как процесс перемещения зарядов в диэлектрике сопровождается двумя основными явлениями. При первом — смещение зарядов ослабляет результирующее поле в ϵ раз (это явление наблюдал Фарадей). Чем больше поляризация диэлектрика при одном и том же поле, тем больше ϵ , т. е. C пропорционально ϵ .

Количественно поляризация определяется вектором поляризации P , равным сумме дипольных моментов в единице объема диэлектрика. Тогда относительная диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon = 1 + \frac{P}{E},$$

очевидно, будет тем больше, чем сильнее вещество способно поляризоваться.

Второе явление — это рассеяние электрической энергии при поляризации, которое различно для разных видов поляризации. Оно практически отсутствует при электронной, атомной и ионной поляризациях и достигает значительных величин при релаксационной и миграционной поляризациях. Рассеяние энергии, прояв-

ляющееся в нагреве поляризуемого вещества, связано с преодолением некоторого сопротивления перемещению зарядов. Разумеется, потери энергии связаны с приложением к диэлектрику изменяющегося во времени электрического поля, под действием которого происходит смещение зарядов.

Способность диэлектрика превращать энергию переменного электрического поля в тепло количественно характеризуется величиной

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{Q} = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi}{U \cdot I \cdot \sin \varphi} \operatorname{ctg} \varphi = \operatorname{tg} (90^\circ - \varphi),$$

т. е. отношением активной мощности P к реактивной Q ; φ — угол сдвига фаз между током и напряжением, который при наличии потерь энергии на величину δ меньше, чем 90 градусов. Угол δ называют углом диэлектрических потерь. Чем меньше он, тем лучше диэлектрик подходит для применения его в конденсаторах переменного напряжения.

Неполярные диэлектрики характеризуются низким значением диэлектрических потерь и проницаемости, почти независимых от температуры и частоты. Полярные диэлектрики, напротив, имеют повышенные значения тангенса угла диэлектрических потерь и электрической проницаемости, существенно зависящих от температуры и частоты (рис. 16). Эти различия основных

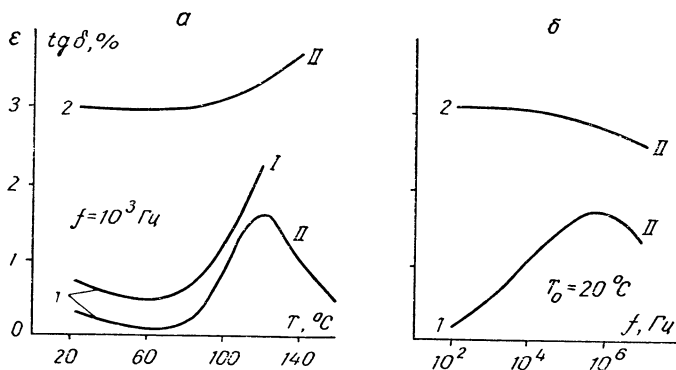


Рис. 16. Температурные (а) и частотные (б) зависимости $\operatorname{tg} \delta$ (кривые 1) и ϵ (кривые 2) для бумаги с жидкой пропиткой (кривые I) и для полиэтилентерефталата (лавсана) — кривые II

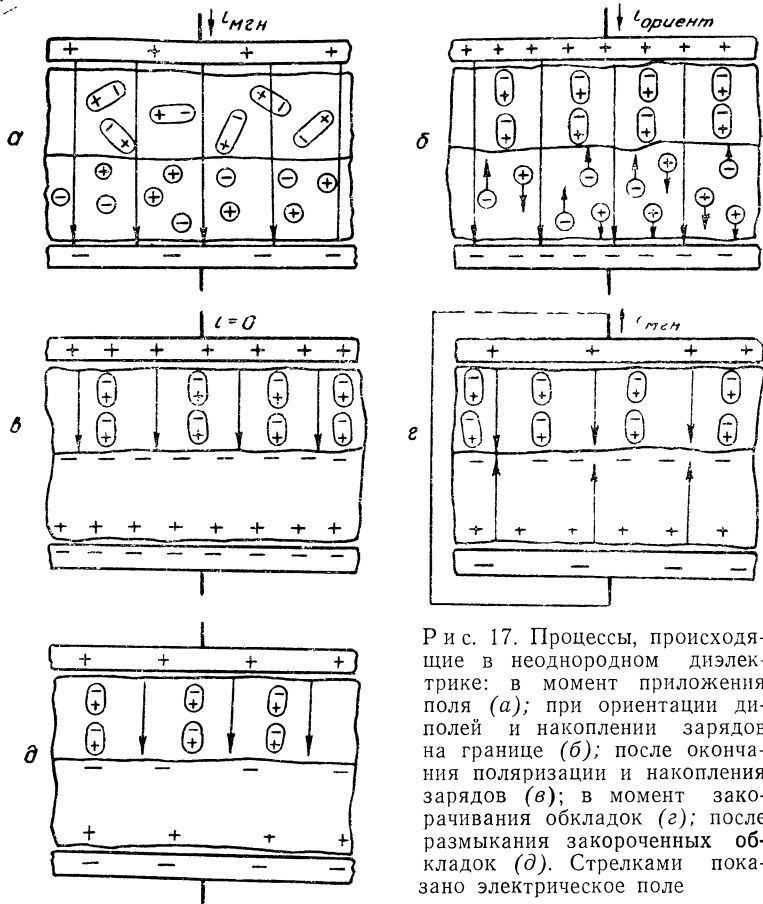
электрических характеристик зависят от особенностей строения вещества и соответственно интенсивности и характера видов поляризации полярных и неполярных диэлектриков.

В области «слабых» электрических полей величина смещения электрических зарядов пропорциональна приложенному полю. Здесь можно провести аналогию с законом Гука в теории упругости, выражающим пропорциональность между деформацией и силой. Нарушение пропорциональности у несегнетоэлектриков, которое можно ожидать вследствие «насыщения» диэлектрика (например, в результате 100% ориентации всех дипольных молекул), почти не наблюдается. Это связано с тем, что величины электрических полей, при которых может быть заметно отклонение от пропорциональности, значительно превосходят электрическую прочность диэлектрика. Поэтому большинство диэлектриков считаются линейными, их диэлектрическая проницаемость ϵ , определяющая степень поляризации, — величина постоянная, не зависящая от воздействующего на диэлектрик электрического поля.

При снятии электрического поля поляризация исчезает: смещенные заряды возвращаются на место, преимущественная ориентация полярных молекул нарушается вследствие теплового движения частиц, вещество становится неполяризованным, каким было до приложения электрического поля. Происходит процесс деполяризации.

6. Абсорбция и десорбция в диэлектриках

Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе до момента установления равновесного состояния между внешней и внутренними силами протекают во времени. Эти процессы создают электрический ток поляризации, являющийся составной частью тока смещения в диэлектрике. Другой составной частью полного тока является ток смещения в вакууме, связанный с изменением электрического поля в ваку-



Р и с. 17. Процессы, происходящие в неоднородном диэлектрике: в момент приложения поля (а); при ориентации диполей и накоплении зарядов на границе (б); после окончания поляризации и накопления зарядов (в); в момент закорачивания обкладок (г); после размыкания закороченных обкладок (д). Стрелками показано электрическое поле

уме*. Обе составляющие накладываются друг на друга.

Токи поляризации упругосвязанных зарядов при электронной и ионной поляризациях настолько кратковременны (порядка 10^{-15} — 10^{-13} с), что эти процессы поляризации можно считать мгновенными.

Токи, обусловленные различными видами замедлен-

* Понятие о токе смещения $i_{\text{см}} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{D}{4\pi} \right) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}$, где D — вектор электрической индукции; E — вектор напряженности электрического поля; P — вектор поляризации вещества, в науку ввел Джеймс Клерк Максвелл.

ной поляризации, наблюдаемые у большого числа технических диэлектриков, называют абсорбционными. При постоянном напряжении абсорбционные токи постепенно уменьшаются до нуля. Здесь постепенно накапливаются на обкладках конденсатора заряды, компенсирующие изменение поля, обусловленного перемещением связанных зарядов.

Процессы абсорбции легко понять, если рассмотреть неоднородный диэлектрик. Пусть между металлическими обкладками помещен двухслойный диэлектрик, одна часть которого, например верхний слой, имеет бесконечно большое сопротивление изоляции (идеальный диэлектрик), а другая — какое-то конечное значение R . На рис. 17, *а* это отражено наличием в верхнем слое лишь связанных зарядов, например диполей, а в нижнем — свободных, например положительных и отрицательных ионов.

После приложения к обкладкам напряжения U в первый момент протекут токи мгновенной поляризации (смещение электронных оболочек и ионов решетки), а также «заряда» вакуумного конденсатора* (см. рис. 17, *а*). В результате на обкладках появятся из внешней цепи положительные и отрицательные заряды (в действительности избыток и недостаток свободных электронов), необходимые для создания электрического поля между обкладками.

В слоях диэлектрика образуются электрические поля, напряженности которых обратно пропорциональны диэлектрическим проницаемостям слоев. Под действием сил поля в верхнем слое будет продолжаться процесс дипольной ориентационной поляризации, который в данном случае можно рассматривать (как достаточно быстрый) совместно с электронной и ионной поляризацией. В то же время в нижнем слое начнется движение свободных зарядов, возникнет электрический ток, величина плотности которого пропорциональна проводимости и напряженности поля (рис. 17, *б*).

* Вакуумный конденсатор — это конденсатор, который получается из рассматриваемого, если диэлектрик заменить вакуумом. Емкость такого конденсатора также называют «геометрической емкостью», что говорит о зависимости емкости только от «геометрии» конденсатора, т. е. от его формы и размеров.

Ток проводимости нижнего слоя приводит к накоплению на его границах зарядов, компенсирующих внешнее поле, вследствие чего поле внутри этого слоя ослабляется и в конечном счете снижается до нуля*. Одновременно с этим поле верхнего слоя усиливается, увеличивается его поляризация, а во внешней цепи протекает ток абсорбции, который также уменьшается до нуля по мере прекращения движения зарядов в диэлектрике (рис. 17,в).

После отключения конденсатора от источника на его обкладках сохраняется напряжение за счет накопленных на них зарядов.

Если обкладки закоротить, то начнутся обратные процессы деполяризации и десорбции. В первый момент с обкладок стекут и нейтрализуются заряды, обусловленные мгновенной поляризацией и разрядом вакуумного конденсатора (рис. 17,г). В нижнем слое появятся электрическое поле, образованное зарядами, накопленными на его границах, и связанный с этим полем электрический ток десорбции. Однако ввиду значительного сопротивления этого слоя для нейтрализации зарядов потребуется определенное время. Поэтому если сразу же после замыкания обкладок их разомкнуть, то на них вновь появится напряжение (рис. 17,д), хотя и меньшей величины, чем было до замыкания. И только если достаточно долго выдержать обкладки закороченными, то на конденсаторе напряжение уменьшится до нуля. Аналогичные процессы наблюдаются, когда оба слоя имеют конечное, но различное сопротивление утечки, и при рассмотрении смещения связанных зарядов в процессе поляризации.

Изменения тока во времени при включении конденсатора на постоянное напряжение, а затем отключение его от источника и закорачивание его обкладок показаны на рис. 18.

Ток конденсатора представляет собой сумму тока

* В этом смысле проводники ведут себя как диэлектрики с бесконечно большой диэлектрической проницаемостью. Действительно, можно считать, что емкость проводников стремится к бесконечности, так как какое бы количество зарядов мы не пропускали через них, напряжение на проводниках, в отличие от конденсаторов, не возрастает, т. е. заряды не накапливаются.

абсорбции $i_{аб}$ и тока утечки $i_{ут}$. Ток утечки обусловлен наличием в диэлектрике небольшого числа свободных зарядов. В большинстве случаев этими зарядами являются ионы. После завершения поляризации через диэлектрик протекает лишь ток утечки (см. рис. 18).

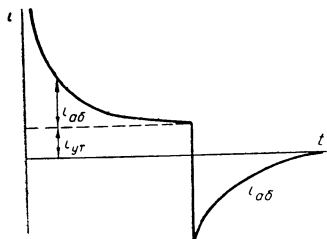


Рис. 18. Зависимость тока конденсатора при включении его на постоянное напряжение от времени

Поляризационные процессы необходимо учитывать при измерениях сопротивления диэлектрика постоянному току. При небольшом времени выдержки приборы регистрируют не только ток утечки, но и существующий вместе с ним ток абсорбции, вследствие чего сопротивление

диэлектрика может оказаться заниженным.

Ввиду сложности определения поляризационных токов, даже для замедленных видов поляризации, сопротивление диэлектрика постоянному току определяется как частное от деления напряжения на ток, измеренный через одну минуту после включения напряжения и принимаемый за ток утечки.

Реальные конденсаторные диэлектрики в большинстве своем неоднородные* либо в силу трудности достижения однородности, либо его неоднородность определяется самой конструкцией диэлектрической системы. Например, последнее время широко распространены бумажно-пленочные конденсаторы, у которых чередуются слои бумаги и синтетической пленки.

Абсорбция электрических зарядов вызывает уменьшение емкости с увеличением частоты, неполную и замедленную отдачу энергии накопительным конденсатором. Если при постоянном напряжении абсорбционные

* Неоднородность реальных диэлектриков обусловлена множеством включений других веществ, отличных от основного диэлектрика. Эти включения могут быть в виде ионов, атомов, молекул более крупных частиц, размер которых доходит до микрометра. Ими могут быть частицы угля, железа, мельчайшие капли воды и т. д., т. е. диэлектрические, полупроводниковые или проводниковые вещества. При изготовлении конденсаторных диэлектриков стремятся получить как можно более однородные диэлектрики, что, однако, повышает их стоимость.

токи рано или поздно заканчиваются и не влияют существенно на работу конденсатора, то при переменном они протекают в течение всего периода нахождения конденсатора под напряжением и сопровождаются потерями энергии.

Каждый вид поляризации характеризуется определенным временем установления. Например, заметное отклонение от статического режима (постоянного поля) для электронной поляризации наблюдается лишь при оптических частотах, для ионной — при частотах, лежащих в инфракрасном диапазоне. Это определяется в основном незначительной массой электронов и ионов, а также пренебрежимо малым трением (потери отсутствуют). Иначе обстоит дело при замедленных видах поляризации. Здесь сказывается и большая инерционность поляризуемых частиц, и, что более важно, наличие значительных сил трения, сопровождающих перемещение зарядов в процессе поляризации, точнее, преобразование энергии движущихся под действием электрического поля частиц в тепловую энергию вследствие взаимодействия этих частиц друг с другом и другими частицами.

Смещение зарядов характеризуется временем релаксации (τ). τ — это такое время, через которое ток абсорбции, обусловленный этим видом поляризации, уменьшится в $e=2,73$ раза. Подобные временные характеристики вводятся для процесса радиоактивного распада (период полураспада), изменения численности населения (период удвоения) и т. д.

В технических диэлектриках одновременно имеется большинство из отмеченных видов поляризации, каждому из которых соответствуют определенные времена релаксации. Поэтому ток абсорбции представляет собой сумму отдельных экспоненциально убывающих токов, каждый из которых обусловлен своим видом поляризации и временем τ_k :

$$i_{аб} = \sum_{k=1}^n I_k \cdot e^{-t/\tau_k}.$$

Времена установления замедленных видов поляризации составляют около $4\tau_k$ и для конденсаторных диэлектриков находятся в пределах 10^4 — 10^{-10} с.

7. Нагрев и охлаждение конденсаторов

По обкладкам и выводам конденсатора протекают токи, и порой довольно значительные. Так, при изменении напряжения со скоростью 1000 В в одну микросекунду через выводы конденсатора емкостью 10 мкФ протекает ток 10 000 А. Эти токи приводят к нагреву выводов, обкладок, контактного узла (места соединений выводов и обкладок). Кроме того, большие переменные токи создают быстро изменяющиеся магнитные поля, вызывающие вихревые токи в корпусе конденсатора, главным образом в его крышке, особенно если она сделана из стали — ферромагнитного материала.

В диэлектрике, находящемся в переменном электрическом поле, за счет активной составляющей абсорбционного тока, обусловленной потерями энергии при поляризации, также выделяется тепло.

Распределение источников тепла в конденсаторе неравномерно. Так, тепловыделение в диэлектрике зависит от ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика, которые в свою очередь зависят от температуры. А поскольку температура конденсатора в различных точках неодинакова, то и тепловыделение будет неравномерным, хотя и распределенным по всему объему, занятому диэлектриком. Расчеты и эксперименты показывают, что перепад температуры в крупногабаритных конденсаторах достигает 35—45°C. Еще большая неоднородность связана с тепловыделением в обкладках, контактном узле, выводах и крышке конденсатора, занимающих малый объем и сосредоточенных в определенном месте конденсатора.

Одновременно с тепловыделением происходит процесс теплопередачи, т. е. эвакуации тепла из более нагретых областей (обычно внутри конденсатора) в более холодные (на его поверхность). Далее с поверхности конденсатора тепло отдается охлаждающей среде — воздуху или воде, если конденсатор с водяным охлаждением.

Если скорость выделения тепла зависит от выделяющейся в конденсаторе мощности, то теплопередача определяется перепадом температур («температурным напором»), теплопроводностью материалов конденсатора.

В установившемся тепловом режиме количество образующегося тепла равно отдаваемому с его поверхности охлаждающей среде. В этом случае разность между максимальной температурой внутри конденсатора T_m и температурой охлаждающей среды T_0 пропорциональна мощности тепловыделения P :

$$T_m - T_0 = P(R_v + R_n) = P \cdot R_T.$$

Коэффициент пропорциональности, или тепловое сопротивление (R_T), равен сумме внутреннего теплового сопротивления R_v , связанного с теплопередачей, и наружного R_n , связанного с теплоотдачей*.

Внутреннее сопротивление зависит только от теплопроводности диэлектрической системы конденсатора и определяется его конструкцией. Внешнее — зависит от поверхности конденсатора, коэффициента теплоотдачи, расположения конденсатора на шасси и в батарее, от условий охлаждения. Эта составляющая может быть значительно снижена за счет увеличения площади поверхности конденсатора (радиаторная конструкция), расположения конденсаторов с большими зазорами и принудительного охлаждения воздушного (обдув вентилятором) или водяного. Разумеется, воздействовать на эту составляющую полного теплового сопротивления имеет смысл, если она соизмерима или больше, чем R_v .

У конденсаторов с полярными диэлектриками, имеющими значительную температурную зависимость ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ (см. рис. 16), при определенной мощности тепловыделения может нарушиться тепловая устойчивость или стабильность. Это явление связано с нарушением теплового баланса конденсатора. Вследствие роста температуры внутри конденсатора возрастает $\operatorname{tg} \delta$, а следовательно, и мощность тепловыделения, которая в свою очередь увеличивает температуру. Происходит лавинообразный рост температуры внутри конденсатора,

* Деление полного теплового сопротивления на наружное и внутреннее допустимо только для конденсаторов, у которых температура на поверхности примерно одинакова во всех точках (поверхность близка к изотермической). Если температура на поверхности распределена неравномерно (в одних местах она ниже, а в других — выше), то такое деление недопустимо в силу неопределенности в оценке перепадов температур внутри и снаружи конденсатора. В последнем случае необходимо использовать понятие и величину полного теплового сопротивления (R_T).

заканчивающийся электротепловым пробоем или термическим разрушением диэлектрика. Конденсатор выходит из строя. Для обеспечения тепловой стабильности необходимо, чтобы кривая мощности тепловыделения от температуры внутри конденсатора $P(T)$ пересекалась с прямой мощности теплоотвода (рис. 19):

$$P = (T_m - T_0) / (R_B + R_H).$$

Точка пересечения соответствует установившимся значениям температуры и мощности тепловыделения. Для устойчивости процесса также необходимо, чтобы прямая теплоотдачи шла круче, чем касательная к кривой тепловыделения в точках их пересечения*. Тепловая стабильность конденсаторов возможна при правильном выборе соответствующих диэлектриков и нагрузок на них.

В конденсаторах при больших импульсных электрических нагрузках могут возникать локальные перегревы элементов конструкции. При коротких и редких импульсах тока диэлектрик конденсатора не успевает нагреться, однако слабым местом здесь становится контактный узел и выводы конденсатора, где в основном сосредоточивается тепловыделение. Происходит локальный нагрев этих частей до высоких температур, достаточных для перегорания предохранителей или обкладок у контактного узла. Последнее часто наблюдается у

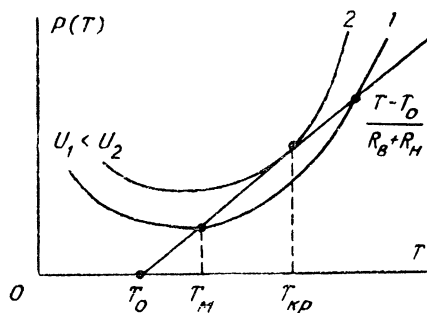


Рис. 19. Зависимость мощности тепловыделения (кривые 1 и 2) и мощности теплоотдачи (прямая) от температуры внутри конденсатора. T_m — рабочая установившаяся температура для напряжения U_1 ; $T_{кр}$ — критическая температура, при которой конденсатор теряет тепловую стабильность

* Для реальных конденсаторов линия теплоотдачи отклоняется от прямой из-за зависимостей наружного теплового сопротивления от мощности тепловыделения (оно падает с увеличением этой мощности) и внутреннего теплового сопротивления от начальных условий и мощности тепловыделения.

конденсаторов с металлизированными обкладками при превышении допустимых нагрузок.

Не всегда выделение тепла в конденсаторе является вредным явлением. Конечно, неразумно использовать конденсатор как нагревательный элемент, например для отопления помещений. Но в ряде случаев технологические конденсаторы создаются именно для нагрева диэлектрика. Этот высокочастотный нагрев диэлектрика широко используется при сушке, в порошковой металлургии, полимеризации, вулканизации эластомеров и т. д.

8. Ионизационные процессы в конденсаторах

Диэлектрики конденсатора по сравнению с электрической изоляцией других электрических устройств и аппаратов — наиболее электрически нагруженные элементы. Для достижения высоких удельных и экономических характеристик конденсатора среднюю напряженность электрического поля в диэлектрике стремятся поднять до предельно допустимого значения. При этом надо иметь в виду, что в процессе эксплуатации, с одной стороны, возможны, хотя и кратковременные, перенапряжения, превышающие рабочие; с другой — реальное электрическое поле в конденсаторе неоднородно.

Эта неоднородность связана с наличием дефектов в структуре диэлектрика, инородных проводящих, полупроводящих или диэлектрических включений, различных загрязнений с неравномерностью толщины диэлектрика и прослоек пропитывающего вещества, наконец, с неравномерностью поля на краю обкладок (так называемый краевой эффект), их неровными краями, дефектами производства и т. д. Все это создает в конденсаторе слабые места, где локальные напряженности электрического поля могут в несколько раз (до 3—5) превышать среднее значение, рассчитанное как отношение рабочего напряжения к средней толщине диэлектрика. Кроме того, наличие таких неоднородностей приводит к появлению составляющих электрического поля, параллельных поверхности обкладок, а это является причиной разрядов вдоль слоев диэлектрика.

В местах концентрации электрического поля прежде всего и начинаются ионизационные процессы. Наиболее легко они возникают в газообразных включениях — пузырьках воздуха или газа, выделившегося из диэлектрика, поскольку газы обладают значительно меньшей электрической прочностью, чем твердые и жидкие диэлектрики. Последнее объясняется большей длиной свободного пробега электронов или ионов до соударения с молекулами.

Небольшое количество содержащихся в газе ионов и электронов при воздействии электрического поля получают добавочную скорость в направлении, зависящем от знака заряда (положительные — по направлению поля, от полюса к минусу, отрицательные — от минуса к плюсу). При этом заряженные частицы приобретают дополнительную (к тепловой) энергию

$$W = q \cdot U,$$

где q — заряд; U — падение напряжения на длине свободного пробега λ . При столкновении заряженных частиц с атомами последним сообщается энергия. Если эта энергия достаточно велика для ионизации атомов — для их расщепления на электроны и положительные ионы, то образуются новые носители зарядов, которые в свою очередь разгоняются электрическим полем. Происходит лавинообразный рост числа ионизированных частиц и электронов, приводящий к электрическому пробое. В ряде случаев происходит фотонная ионизация, которая благодаря большой скорости распространения излучения приводит к особенно быстрому развитию каналов с повышенной проводимостью — стримеров.

Ионизация сопровождается свечением в виде короны (огни святого Эльма) и треском (шум проводов высокого напряжения, гром и молния).

Ионизационные процессы в жидких и твердых диэлектриках имеют примерно тот же механизм, что и в газах, но происходят при более высоких напряженностях. Так, если для воздушного промежутка в 1 см электрическая прочность (напряженность поля, при которой наступает пробой) около 3,2 В/мкм, то для очищенного трансформаторного масла — 20—25 В/мкм, для стекла, слюды, пропитанной бумаги — 100—

300 В/мкм, монокристаллов щелочно-галогидных соединений — 1000 В/мкм и более.

С повышением напряжения появляются частичные разряды (ЧР), при которых в изоляции происходят неполные пробой. Последние приводят к перезаряду поверхности включения, где произошел разряд, ионами и появлению внутреннего поля, направленного навстречу внешнему, в результате разряд прекращается. Длительность единичного ЧР составляет около 10^{-8} с. Дальнейшее возрастание напряжения, приложенного к обкладкам, приводит к росту поля во включении и к очередному его пробую. С переменой полярности напряжения на обкладках внешнее поле складывается с внутренним и ЧР возникает при меньшем значении напряжения. Интенсивность ЧР возрастает с увеличением частоты и амплитуды приложенного напряжения:

$$P = A E^m \cdot f^n.$$

В местах возникновения ЧР происходит разложение жидкого и разрушение твердого диэлектрика под действием электронных и ионных лавин, а также разного рода излучений, возникающих при микропробоях. Среди продуктов разложения могут быть газы, сильные окислители, такие как хлор, озон, окись азота и др. Действие ЧР вызывает так называемое ионизационное старение диэлектрика, сопровождающееся накоплением продуктов разложения, которые, с одной стороны, изменяют условия возникновения ЧР, а с другой — ухудшают электрические и механические свойства диэлектрика. При большой интенсивности (порядка 10^{-9} Кл) ЧР переходят в стадию критических частичных разрядов, которые приводят к быстрому разрушению некороностойких диэлектриков.

Короностойкость пропитанных жидкостями диэлектриков зависит от газовыделяющей и газопоглощающей способности пропитки. Короностойкая изоляция, например бумага, пропитанная хлорированными дифенилами, во-первых, выделяет газы при воздействии более значительного электрического поля, во-вторых, образует меньше продуктов разложения от ЧР и при разложении хлордифенила образуется свободный углерод, создающий токопроводящие пленки, выравнивающие электрическое поле. В результате ЧР затухают.

Если частичные разряды лишь старят диэлектрик конденсатора, не нарушая внезапно его работоспособности, то полный пробой выводит конденсатор из строя. Он происходит в самом слабом месте, где наряду с концентрацией электрического поля на неоднородностях диэлектрик ослаблен ионизационным, тепловым или электрохимическим старением.

9. Электрохимические явления в конденсаторах

Электрическое поле, воздействующее на диэлектрик, вызывает движение ионов и других заряженных частиц, ускорение химических реакций. Наиболее интенсивно электрохимические процессы протекают при постоянном напряжении. Повышенные температуры и влажность тоже способствуют электрохимическим превращениям веществ диэлектрика и обкладок конденсатора.

В результате переноса ионов и обмена зарядами образуются химически активные вещества, разрушающие диэлектрик и сами обкладки, а также металлические дендриты (нити — «усы»), направленные своими остриями в толщу диэлектрика и снижающие его электрическую прочность. Вблизи поверхности обкладок происходят химические реакции, в которых материал обкладок может быть не только веществом, взаимодействующим с другими продуктами распада, но и активным катализатором химических процессов.

Ускорению химических реакций способствуют и продукты, образующиеся при частичных разрядах, такие как водород, хлор, хлористый водород, атомарный кислород, озон, окись азота. Эти сильные окислители разрушают клетчатку бумаги, окисляют синтетические пленки.

С ростом частоты приложенного напряжения электрохимические процессы ослабевают, так как уменьшается перемещение ионов.

Основным средством борьбы с электрохимическими процессами и их нежелательными последствиями является добавление стабилизирующих добавок, связывающих продукты разложения и замедляющих электроли-

тические процессы. Для защиты обкладок фольгу покрывают лаковой пленкой. Ею часто покрывают бумажный диэлектрик.

И все же электрохимические процессы не всегда вредны. Вспомним, например, электролиз, без которого невозможно получение алюминия, меди и других чистых металлов; гальванопластику и гальваностегию. Да и для конденсаторов эти процессы используются, например, для формовки слоя диэлектрика алюминиевых электролитических конденсаторов. Это необходимо потому, что при хранении таких конденсаторов без напряжения их диэлектрик (оксидная пленка) разрушается, и для восстановления ее требуется подача напряжения.

10. Магнитное поле в конденсаторах

Где существует электрический ток, там всегда есть магнитное поле. В конденсаторе ток имеется в выводах, соединительных шинках, обкладках (все это токи проводимости — движение свободных электронов); в диэлектрике между обкладками — ток поляризации (движение связанных зарядов). Эти токи создают магнитное поле, влияющее на работу конденсатора.

Прежде всего переменное магнитное поле индуцирует (наводит) электродвижущие силы (ЭДС) в металлических частях конденсатора — его корпусе и крышке. Эти ЭДС вызывают вихревые токи в металлических частях и их нагрев, увеличивая тем самым мощность потерь в конденсаторе (рис. 20). Образуется как бы трансформатор, первичной обмоткой которого являются выводы и обкладки конденсатора, вторичной (короткозамкнутой) — корпус и крышка конденсатора, и обе «обмотки» связаны общим магнитным полем. Потери энергии и нагрев корпуса тем больше, чем выше частота тока и больше его величина. Они также зависят от материала корпуса: в стали и железе* потери значительно больше, чем в алюминии, в пластмассовом корпусе потери отсутствуют.

* Кроме усиления магнитного поля в железе возникают и так называемые гистерезисные потери, связанные с перемагничиванием.

При высокой частоте и больших геометрических размерах сечения проводника переменный ток распределяется неравномерно: он вытесняется из внутренних областей проводника к его поверхности. Это явление называется поверхностным эффектом и может быть объяснено следующим образом. Переменный магнитный поток наводит в проводнике ЭДС, противодействующую току в нем. Так как внутренние области проводника охватываются большим магнитным потоком, чем поверхностные, то в них, естественно, больше ЭДС и меньше ток (рис. 21). Для характеристики поверхностного эффекта в проводниках используется понятие глубины проникновения тока в проводник*:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \mu_0 \sigma}},$$

где ω — угловая частота; μ и μ_0 — магнитные проницаемости материала и вакуума; σ — удельная проводимость металла проводника. Поверхностный эффект заметен и его следует учитывать лишь тогда, когда Z_0 оказывается меньше размеров сечения проводника (ра-

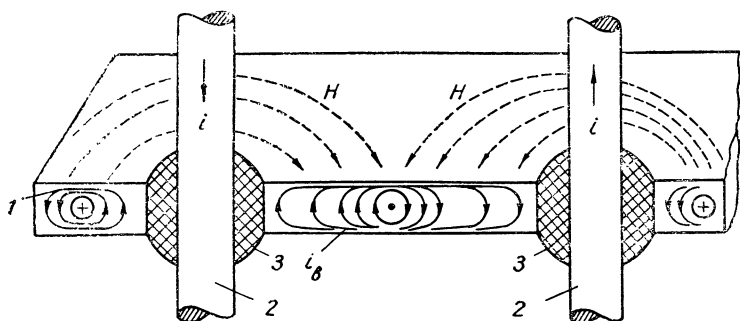


Рис. 20. Образование вихревых токов в крышке конденсатора: 1 — крышка; 2 — выводы; 3 — проходные изоляторы; i — рабочий ток конденсатора; H — линии напряженности магнитного поля; i_v — вихревые токи

* Под глубиной проникновения понимается расстояние, на котором плотность тока в 2,73 раза меньше, чем на поверхности. На частоте 10^6 Гц глубина проникновения в меди составляет около $6 \cdot 10^{-2}$ мм, тогда как на частоте 2000 Гц — 1,5 мм, а на 50 Гц — 10 мм.

диуса круглого проводника или толщины прямоугольного).

Если поверхностный эффект связан с собственными токами проводника, то аналогичное явление перераспределения тока по сечению проводника под влиянием электромагнитного поля токов соседних проводников носит название эффекта близости.

По закону полного тока на внутренних поверхностях двух шин с токами противоположных направлений напряженность магнитного поля больше, чем на наружных. Поэтому из-за эффекта близости токи вытесняются к наружным областям поверхностей проводников. Вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости эквивалентные активные сопротивления возрастают по сравнению с их значениями при постоянном токе и становятся частотно-зависимыми. Из-за этого потери энергии также возрастают.

Магнитное поле токов в обкладках и диэлектрике тоже вызывает перераспределение тока по сечению секции. Однако здесь, как показывают расчеты электромагнитных полей, наибольшая плотность тока обычно в центре секции. С наличием магнитных полей в конденсаторе связано существование у них отличной от нуля индуктивности, обуславливающей определенные ограничения по частоте рабочего напряжения*.

Отметим, что поверхностный эффект используется как полезное явление в частотно-зависимых резисторах. С повышением частоты их сопротивление резко возрастает за счет вытеснения токов на поверхность дисков с повышенным удельным сопротивлением, насаженных

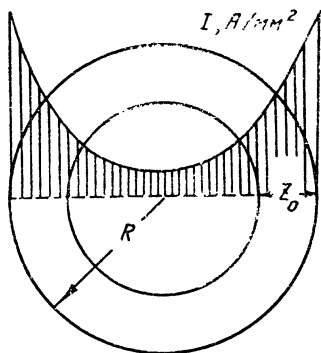


Рис. 21. Распределение тока по сечению круглого проводника (поверхностный эффект)

* Из-за индуктивности в конденсаторе на некоторой частоте, называемой частотой первого резонанса, возникает резонанс напряжения. Выше этой частоты конденсатор перестает быть конденсатором, так как его сопротивление приобретает индуктивный характер.

на медный или алюминиевый стержень. Такие резисторы применяют для подавления высокочастотных колебаний или коротких волн, возникающих иногда в батареях конденсаторов при коммутациях и представляющих опасность для конденсаторов. Кроме того, поверхностные токи позволяют локализовать нагрев поверхности детали при закалке в поле токов высокой частоты.

11. Механические явления в конденсаторах

50 000 Н, или более 5000 кгс — такова расчетная величина силы, действующей на обкладки конденсатора емкостью 10 мкФ при напряжении на нем 1000 В и толщине диэлектрика 50 мкм. И тем не менее эта огромная сила не разрушает довольно слабую конструкцию конденсатора, так как она распределена на большой площади обкладок. Кроме того, силы действуют на одни и те же точки обкладок в разные стороны, так что значительная доля этих сил уравнивается. Оставшаяся неуравновешенная часть сил сжимает диэлектрик, деформируя его в такт с действующим напряжением. Эта вибрация является источником дополнительных потерь. Она также сокращает срок службы конденсатора, способствует возникновению частичных разрядов.

Роль электромеханических явлений, в том числе электрострикционных, существенно возрастает в конденсаторах с твердой пропиткой, например с эпоксидными компаундами. Высокая механическая добротность монолитных конденсаторных секций делает возможными электромеханические резонансные явления, что порождает повышенные потери и звуковое излучение конденсатора. Вибрации выводов секций, контактных узлов, вводов конденсаторов являются причиной механического (усталостного) старения металлических элементов конструкции.

На диэлектрик, частично заполняющий плоский конденсатор и имеющий поверхность раздела, перпендикулярную электродам, действует сила такого напряжения, что в межэлектродное пространство втягивается диэлектрик с большой величиной ϵ . Это явление используется для измерения диэлектрической проницаемости жидких

диэлектриков, для электросепарации*. Появление силы объясняется наличием неоднородного поля вблизи краев электродов. Именно там и возникают силы, заставляющие диэлектрик втягиваться. Неоднородное электрическое поле стремится создать и в электростатических фильтрах, задерживающих дымы и мелкие частицы, электросепараторах, так как на поляризованные частицы только в неоднородном поле могут действовать неуравновешенные силы, заставляющие частицы двигаться в направлении области с наибольшей напряженностью поля. В однородном поле действуют только силы, заставляющие частицы поворачиваться, ориентируясь вдоль направления поля.

На выводы и соединительные шинки действуют и механические силы; однако их природа связана со взаимодействием магнитных полей, созданных в них токами. Согласно закону Ампера, сила, действующая на проводник с током, находящийся в магнитном поле, равна произведению длины проводника l на ток I и величину магнитной индукции $B=I$. По выводам протекает ток одной и той же величины, но противоположного направления. Следовательно, сила $F=\mu_0 \frac{I^2 l}{2\pi d}$

будет стремиться раздвинуть эти провода, оттолкнуть их друг от друга. Величина этой силы, например при токе $I=100$ А, $l=10$ см, расстоянии между выводами $d=1$ см равна $F=4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100^2 \times 0,1/2\pi \cdot 10^{-2}=2H \approx \approx 0,2$ кг, т. е. она достаточно мала. Однако с увеличением тока эта сила быстро растет и достигает заметных значений у импульсных конденсаторов, ток разряда которых составляет тысячи и десятки тысяч ампер.

Помимо сил, связанных с электрическими и магнитными полями, в конденсаторе существуют термомеханические напряжения, обусловленные разными температурами в конденсаторе, отличием температурных режимов при эксплуатации и изготовлении.

* В качестве примера полезного использования механических сил, возникающих при взаимодействии электростатических зарядов, можно привести также электростатический вольтметр, являющийся, по существу, конденсатором, у которого измеряется сила взаимодействия обкладок. Такой вольтметр по сравнению с другими конструкциями имеет самое большое входное сопротивление и поэтому практически не потребляет энергии от цепи измерения.

Термомеханические напряжения, возникающие при неравномерном нагреве частей конструкции конденсатора, прежде всего опасны для места соединения обкладок с контактным узлом, а также для места соединения проходных изоляторов с корпусом*.

12. Самовосстановление и «самозалечивание» в конденсаторах

Немногие из технических устройств обладают такими почти «биологическими» способностями, как самовосстановление работоспособности. Пожалуй, кроме конденсаторов можно назвать лишь селеновые вентили, способные восстанавливать запирающий слой после пробоя.

Таким же свойством самовосстановления обладают некоторые типы конденсаторов. Конденсаторы с металлизированными обкладками восстанавливают электрическую прочность диэлектрика после пробоя. В зоне пробоя ток короткого замыкания достигает максимальной плотности и испаряет (выжигает) тонкий слой металла в окрестности этой зоны. Электрическая дуга увеличивает свою длину и гаснет, так как в зоне пробоя давление возрастает за счет газообразных продуктов разложения вещества диэлектрика и пропитки. Вокруг места пробоя образуется свободный от металла обкладок участок диэлектрика малой площади — от долей до десятков квадратных миллиметров (рис. 22). Этот процесс происходит за короткое время — порядка 10^{-5} с. Выделяющаяся при этом энергия не вызывает существенного повреждения диэлектрика, лишь в месте пробоя остается тонкое отверстие диаметром в единицы или десятки микрометра.

Таким образом, тонкие (менее 0,1 мкм) обкладки играют роль предохранителя, отключающего поврежденный участок диэлектрической системы. При этом емкость конденсатора почти не меняется.

* В результате термомеханических напряжений в последнем случае часто нарушается герметичность корпуса конденсатора, что в конечном итоге ускоряет выход его из строя из-за попадания внутрь конденсатора влаги и воздуха.

Расчеты и эксперименты показывают, что емкость металлобумажного конденсатора $C=1,5$ мкФ уменьшается на 1% лишь после 10^5 пробоев (актов самовосстановления). Пленочные конденсаторы с металлизированными обкладками более чувствительны к самовосстановлению и выходят из строя значительно раньше. При каждом пробое ликвидируется наиболее слабое место, где была пониженная электрическая прочность или сконцентрировано электрическое поле. Поэтому для следующего пробоя требуется несколько большее напряжение*.

Качественное самовосстановление достигается путем подбора материала обкладок, их толщины, формы и технологического режима нанесения слоя металлизации. С помощью специального рисунка обкладок обеспечивается оптимальное сопротивление, достаточно низкое для рабочих токов и повышенное току короткого замыкания при пробое. Такие конструкции, впрочем, вызывают удорожание конденсаторов.

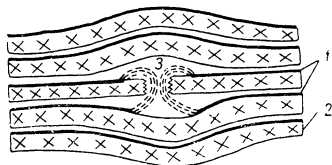
«Самозалечивание» дефектных мест наблюдается также в конденсаторах с оксидными диэлектриками. Выше в связи с электрохимическими процессами упоминалось о формировании слоя диэлектрика в алюминиевых электролитических конденсаторах.

В оксидно-полупроводниковых конденсаторах слой диэлектрика уже при производстве образуется с рядом дефектов: сквозные поры, локальные утоньшения и т. д. Такие дефекты могут возникать и при эксплуатации в результате различных физико-химических явлений.

В дефектных местах под действием рабочего напряжения протекают повышенные токи утечки, приводящие к разогреву этих мест. Под действием электрического поля и повышенной температуры возникает пе-

Рис. 22. Схематическое изображение акта самовосстановления в конденсаторе с металлизированными обкладками:

1 — обкладки; 2 — диэлектрик; 3 — электрическая дуга



* Пробой может возникнуть под действием рабочего напряжения из-за снижения электрической прочности диэлектрика в результате старения или же вследствие перенапряжений во время эксплуатации.

ренос атомов металла анода (например, тантала в танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторах) и окисление этого металла кислородом, «поставщиком» которого при нагреве служит слой твердого электролита (двуокись марганца). Нарастивается слой диэлектрика в дефектном месте, и оно «залечивается».

Последние исследования показали, что при «залечивании» важную роль играет влага — она способствует «самозалечиванию». Явления самовосстановления и «самозалечивания» используются для повышения надежности работы конденсаторов путем предварительной тренировки их в специальных режимах по напряжению и температуре.

13. Шумы в конденсаторах

Акустические шумы, издаваемые конденсатором в звуковом диапазоне, определяются механическими явлениями. Сильно гудят трансформаторы, дроссели, провода при больших токах. Это гудение, вероятно, слышал каждый. Конденсаторы выгодно отличаются от своих собратьев по электротехнике. Ввиду малой длины выводов и соединительных шинок, а также благодаря жидкой пропитке звуковое излучение конденсаторов невелико. Могут издавать звук конденсаторы с твердой пропиткой и непропитанные конденсаторы при слабой намотке секций. Частота издаваемого звука обычно совпадает с частотой напряжения на конденсаторе. Максимальной силы звук, издаваемый конденсаторами, достигает при совпадении частоты напряжения с частотой механического резонанса.

Кроме акустических конденсаторы издают электрические шумы, обусловленные частичными разрядами (микропробоями) и актами самовосстановления (макропробоями). Интенсивность этих шумов невелика: частичные разряды имеют ничтожно малую мощность (порядка 10^{-5} — 10^{-8} Вт).

Акты самовосстановления значительно мощнее, но зато весьма редки. При самовосстановлении напряжение на конденсаторе резко скачкообразно изменяется, на величину в сотые и десятые доли вольта.

В слюдяных и керамических конденсаторах с металлизированными обкладками из серебра электрические

шумы бывают значительными в результате явления «мерцания емкости». Здесь под действием напряжения происходит частое хаотическое скачкообразное изменение емкости конденсатора, достигающее десятых долей процента. При этом изменяются напряжение и ток конденсатора. Изменение емкости вызвано тем, что края таких конденсаторов не резко ограничены, а состоят из множества «островков», контакт между которыми нестабилен и изменяется под действием напряжения.

Недавно было установлено, что причиной электрических шумов в многослойных керамических конденсаторах некоторых типов может быть пьезоэлектрический эффект*.

Постоянно действующими источниками электрических шумов в конденсаторах являются: тепловые флуктуации поверхностных зарядов диэлектрика и обкладок; процессы, сопровождающие перемещения заряженных частиц между обкладками; электрохимические процессы; дискретный характер поляризации. И все же по сравнению с другими элементами электрических цепей, например резисторами или катушками индуктивности, у конденсаторов меньший уровень шума. Напряжение на обкладках конденсатора не может изменяться скачком, так как иначе потребовалась бы бесконечно большая мощность. Поэтому все перечисленные «шумящие» явления приводят к небольшим изменениям напряжения на конденсаторе. Однако электрические шумы, порождаемые актами самовосстановления, мерцанием емкости и пьезоэлектрическими эффектами, могут нарушить работу точной и высокочувствительной аппаратуры, поэтому в ней обычно применяют конденсаторы с фольговыми обкладками.

14. Нелинейные явления в конденсаторах

Большинство конденсаторов изготавливаются с линейным диэлектриком, у которого смещение заря-

* Пьезоэлектрический эффект в конденсаторах проявляется в появлении электрических зарядов на его обкладках при механических воздействиях на конденсаторы (удары, вибрации). Электрический шум (скачки напряжения) при этом может достигать сотых и даже десятых долей вольта.

дов при поляризации пропорционально напряженности внешнего поля. Однако существуют диэлектрики, не обладающие данным свойством. Это прежде всего сегнетоэлектрики, подобные по своим характеристикам ферромагнетикам: у них есть области спонтанной (самопроизвольной) поляризации (так называемые домены), наблюдается гистерезис, явное насыщение при поляризации, зато диэлектрическая проницаемость таких диэлектриков достигает десятков и сотен тысяч единиц.

Промышленностью выпускаются конденсаторы с нелинейным диэлектриком — вариконды, у которых емкость зависит от приложенного к ним напряжения. Обычно с ростом напряжения емкость сначала растет, а затем уменьшается*. Такие конденсаторы применяются в диэлектрических усилителях, устройствах автоматики, демпфирующих цепочках, в формирующих цепях для создания напряжения требуемой формы и т. д. Но даже в конденсаторах с практически линейным диэлектриком наблюдаются нелинейные явления как в металлических частях конструкции, так и в диэлектрике.

При наличии газовых включений в диэлектрике с повышением напряжения наблюдается резкое возрастание $\text{tg}\delta$, вызванное мощными ионизационными процессами в диэлектрике или на краю обкладок. Жидкая пропитка значительно увеличивает напряженность поля, при которой растет $\text{tg}\delta$. Отметим, что $\text{tg}\delta$ увеличивается за счет ионизационных процессов уже в области сильных полей.

В области низких напряженностей поля в конденсаторах с жидкой, особенно полярной, пропиткой диэлектрика может повышаться $\text{tg}\delta$, сильно проявляющийся при повышенных температурах и низких частотах. Этот так называемый эффект Гартона объясняется присутствием в пропитывающей жидкости различных загрязнений ионного характера, перемещение которых ограничено в прослойках пропитывающей жидкости

* При наложении внешнего поля домены ориентируются в направлении поля. Образуются также новые домены, что приводит к увеличению емкости. С ростом величины поля все большее число доменов оказывается ориентированными с полем. При большой величине поля наступает насыщение и все домены оказываются ориентированными по полю, а емкость конденсатора перестает зависеть от напряжения.

(рис. 23, а). С ростом температуры падает вязкость пропитывающей жидкости и увеличивается число ионов вследствие процессов диссоциации в жидкости. С ростом частоты этот эффект ослабевает из-за инертности частиц и вязкого сопротивления их перемещению. С увеличением амплитуды напряжения возникает барьерный эффект, когда в течение части периода ионные включения прижаты силами поля к стенкам пор, в которых происходят колебания заряженных частиц (рис. 23, б).

При наложении постоянного поля эти включения прижимаются к стенкам и не перемещаются с изменением напряжения, если сохраняется его полярность. В результате величина $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается, ϵ , а следовательно, емкость конденсатора остается постоянной. Этот эффект используется для оценки наличия ионных загрязнений в пропитывающей жидкости путем измерения зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения в условиях повышенных температур и низких частот.

Нелинейные явления в проводящих частях конденсатора связаны главным образом с контактным узлом. Обкладки и контактный узел не образуют идеальное металлическое соединение. Особенно заметно это у конденсаторов с вкладными контактами и металлизированными обкладками вследствие неравномерной структуры металла контактного узла (шоопировки), а также из-за

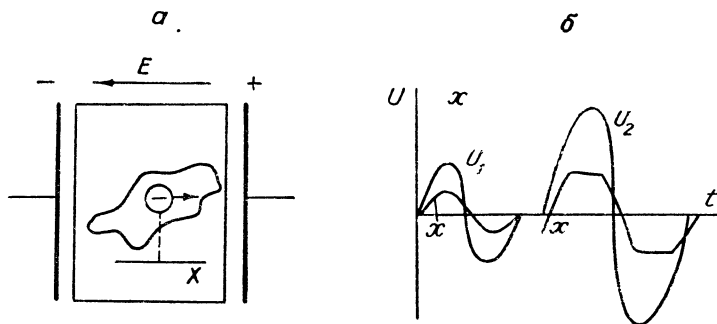


Рис. 23. К объяснению барьерного эффекта Гартона: схематическое изображение конденсатора с порой и заряженной частицей (а); изменение характера перемещения частицы при разной величине напряжения (б). U — напряжение; x — перемещение частиц

частичного окисления поверхности металла торцов обкладок в процессе изготовления конденсаторов. Оксидная пленка в контакте с обкладками и контактным узлом обладает в некоторой степени свойствами $p-n$ -перехода полупроводниковых материалов, что и объясняет наличие нелинейной зависимости между током и напряжением в контактном узле. Ее влияние на характеристики конденсатора заметно только в условиях низких значений токов и напряжений, так как при больших оксидная пленка пробивается и не воздействует на напряжение на конденсаторе.

Глава III

КАК ДОЛГО «ЖИБУТ» КОНДЕНСАТОРЫ

15. Надежность — основное требование к конденсаторам

Требование надежности предъявляется ко всем техническим объектам. И это неудивительно, так как надежность — свойство изделия выполнять заданные функции в течение требуемого промежутка времени. Одновременно с выполнением функций необходимо сохранение эксплуатационных показателей в заданных пределах. Иными словами, надежность определяется работоспособностью изделия. Нет ничего абсолютно надежного, т. е. способного работать неограниченно долго. Рано или поздно любое изделие изнашивается, стареет и требует либо ремонта, либо замены новым.

Конденсаторы относятся к неремонтируемым изделиям: восстановление их работоспособности либо невозможно (пробой диэлектрика), либо нецелесообразно (облом вывода). Поэтому время функционирования конденсатора до первого отказа, т. е. первого нарушения его работоспособности, по существу, является временем его «жизни», или ресурсом. Надежность конденсаторов обеспечивается тремя основными условиями сохранения работоспособности: безотказностью, сохраняемостью, долговечностью.

Изготовленный на заводе конденсатор не сразу устанавливается в аппаратуре и начинает работать. Некоторое время, иногда значительное, он хранится на складах, транспортируется и т. д. И еще не приступив к работе, какая-то часть конденсаторов уже выходит из строя из-за механических повреждений, воздействий климатических условий (температура, влажность) и т. д. Способность противостоять этим воздействиям называется сохраняемостью.

Конденсаторы, установленные в аппаратуре, подвергаются различным электрическим, тепловым и механическим нагрузкам. Сохранение работоспособности кон-

денсатора в течение некоторой наработки, продолжительности эксплуатации или испытания называется безотказностью. Обе эти стороны надежности объединяются долговечностью — свойством конденсатора сохранять работоспособность до предельного состояния, которое определяется невозможностью его дальнейшей эксплуатации.

— Электротехнические, и особенно электронные установки, обычно содержат большое число элементов. Например, число конденсаторов в них, как мы уже упоминали, может достигать десятков тысяч. Поэтому требования к надежности этих элементов более жесткие, чем требования к надежности всей установки.

— Повышение надежности достигается прежде всего на этапах конструирования и изготовления за счет применения совершенных материалов, оптимальных конструкций и высокого уровня технологического процесса. Воздействует на надежность также точный расчет нагрузок на конденсаторы и правильный выбор их типов и номиналов. Чем в более легком режиме работает конденсатор, тем обычно, при прочих равных условиях, выше его надежность. Однако при этом ухудшаются экономические показатели вследствие недоиспользования возможностей конденсатора.

Применение специальных схем, малочувствительных к изменениям параметров конденсатора либо способных работать при выходе из строя (отказе) части конденсаторного оборудования, позволяет строить надежные системы из надежных элементов. Конечно, приходится вводить избыточность оборудования или его резервирование.

16. Отказы конденсаторов

Вероятно, каждый наблюдал, как нормально работающая машина, прибор или устройство, внезапно или постепенно ухудшая характеристики, отказывается дальше выполнять свои функции. Примеров много: перегорела лампа, исчезли изображение или звук у телевизора, заглох двигатель автомобиля и т. д. Работоспособность нарушается по различным причинам, которые можно разделить на два неравноценных класса. В

первый — входит все то, что не связано непосредственно с функционированием конденсатора в устройстве: различного рода повреждения при хранении, транспортировке, монтаже и эксплуатации. Другой класс причин связан непосредственно с функционированием конденсаторов.

Причины отказов самые разнообразные, а вот вид отказа — это пробой конденсатора (короткое замыкание цепи) или потеря емкости (обрыв цепи). Отказы часто бывают внезапными — без заметных изменений параметров конденсаторов и связанными, с более или менее значительным изменением параметров. Например, изменение емкости на 1% для большинства устройств, содержащих конденсаторы, не отразится на их работоспособности, в то время как такое изменение емкости в точной измерительной аппаратуре или в устройствах связи может привести к их отказу.

Отказ — явление случайное. Оно связано с большим количеством различных процессов, происходящих как в конденсаторе, так и вне его. Большую роль играют процессы старения и распределения «слабых» мест. Если взять, например, один какой-либо конденсатор, проработавший время t , то для него определить время, которое он еще будет работать без отказа, т. е. прогнозировать его индивидуальный ресурс, практически невозможно. Коль скоро отказ — случайное событие, то и для характеристик надежности необходимо ввести случайные величины, для которых можно дать лишь распределение вероятностей.

Проведем следующий эксперимент. Возьмем N конденсаторов, например 10 000 штук, и одновременно включим их в работу, т. е. подадим на них напряжение, повысим температуру охлаждающей среды и т. д.

В каждую единицу времени Δt (секунду, час, месяц, год в зависимости от уровня надежности конденсатора) будем фиксировать число конденсаторов $m(\Delta t)$, отказавших за этот интервал времени. Окажется, что первое время, в начале эксперимента, это число будет

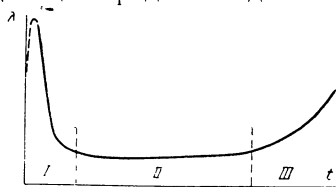


Рис. 24. Зависимость интенсивности отказов λ от времени t

большим: выходят из строя самые «слабые» конденсаторы, имеющие дефекты изготовления или повреждения (область I, рис. 24). В течение эксперимента это число будет падать до некоторой величины и затем длительное время оставаться практически постоянным (область II, рис. 24). Такой период нормальной эксплуатации связан с отказами, вызванными старением элементов конструкции конденсатора и в первую очередь его активного диэлектрика.

В дальнейшем число отказавших конденсаторов вновь возрастет вследствие существенного ускорения процессов старения (область III, рис. 24). Интенсивность отказов, определяющая надежность конденсаторов, будет такова:

$$\lambda(t) = \frac{m(\Delta t)}{\Delta t [N - m(\Delta t_i)]} \approx \frac{m(\Delta t)}{\Delta t \cdot N}.$$

Очевидно, чем больше $\lambda(t)$ в данный момент времени, тем больше вероятность отказа каждого из конденсаторов, и, наоборот, при $\lambda(t)$, стремящемся к нулю, можно ожидать, что отказов в этом промежутке времени не будет.

Если N — число конечное, хотя и достаточно большое, то число отказов $m(\Delta t)$ — величина случайная и интенсивность отказов, определенная экспериментально, будет также случайной (ее называют выборочной интенсивностью отказов).

Если определить $\lambda(t)$ для всей совокупности конденсаторов данного типа (разумеется, такого эксперимента проводить не следует, так как в результате не останется конденсаторов, пригодных для практического использования), то полученная величина охарактеризует всю совокупность.

Для расчетов надежности считают, что существует неслучайная зависимость $\lambda(t)$, определяемая комплексом условий изготовления, хранения и эксплуатации конденсаторов.

Так, просуммировав все отказы до момента t , можно определить вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \cong 1 - \int_0^t \lambda(t) dt \cong \frac{N - \sum m_i}{N}$$

конденсатора на интервале от 0 до t . Величина $1-P(t)$ представляет собой вероятность противоположного события, т. е. того, что на интервале времени 0, t произойдет отказ.

Для технических устройств важнее знать не вероятность отказа в каждый момент времени, а время, в течение которого не произойдет отказ; другими словами, вероятное время жизни, или ресурс, конденсатора. Эта величина также случайная и ее распределение зависит от интенсивности отказов $\lambda(t)$. Определяется она той же вероятностью $P(t)$. Так, $P(t)$ — вероятность безотказной работы на интервале времени от 0 до t представляет собой вероятность того, что долговечность будет больше t , а величина $1-P(t)$ — вероятность того, что ресурс меньше, чем t .

При испытаниях на надежность стараются, во-первых, сократить до минимума число испытываемых конденсаторов и, во-вторых, что более важно, сократить время испытания. Для этого используются ускоренные испытания, в которых за счет более интенсивных электрических и тепловых нагрузок резко ускоряются процессы старения, сокращающие время жизни конденсатора. Переход к рабочим нагрузкам сопровождается соответствующим изменением масштаба времени. Например, существует «правило восьми или десяти градусов», согласно которому долговечность сокращается вдвое при повышении температуры на 8—10°C. Более точно время жизни конденсатора пересчитывают с помощью моделей долговечности, построенных на базе моделей динамики старения или независимо от них — в виде интерполяционных формул.

При испытаниях фиксируются моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_n$ отказов конденсаторов, на основании которых строится эмпирическая кривая накопленной частоты отказов во время испытания

$$\hat{F}(\tau) = \frac{N_0(\tau)}{N},$$

где $N_0(\tau)$ — число конденсаторов из N испытуемых, которые отказали к моменту времени τ (рис. 25). Вероятность безотказной работы в течение времени τ следующая:

$$P(\tau) = 1 - \hat{F}(\tau) = \frac{N - N_0(\tau)}{N}.$$

Поскольку время жизни, или ресурс, — величина случайная, для характеристики долговечности конденсаторов используют либо среднее время жизни, либо γ -процентный ресурс (τ_γ), т. е. время, в течение которого работоспособность сохраняет $\gamma\%$ конденсаторов от первоначального количества. Величина τ_γ , называемая также гарантированной долговечностью, определяется уравнением

$$P(\tau_\gamma) = \frac{\gamma}{100\%}.$$

И все же недостаточно только констатировать факт отказа. Для повышения надежности, а также прогнозирования отказов необходимо изучать их причины, механизм процессов, приводящих к отказу.

Наиболее часто отказ конденсатора связан с пробоем диэлектрика. Напряжение $U_{пр}$, при котором наступает пробой, называется пробивным напряжением, а соответствующая ему напряженность поля $E_{пр}$ — электрической прочностью диэлектрика. $U_{пр}$ измеряется чаще всего в киловольтах, а $E_{пр}$ — мегавольтах на метр или в вольтах на микрометр ($1 \text{ МВ/м} = 1 \text{ кВ/мм} = 10^6 \text{ В/м} = 1 \text{ В/мкм}$).

При пробое происходит резкое локальное внезапное возрастание плотности тока. Различают электрический, тепловой и электрохимический виды пробоя.

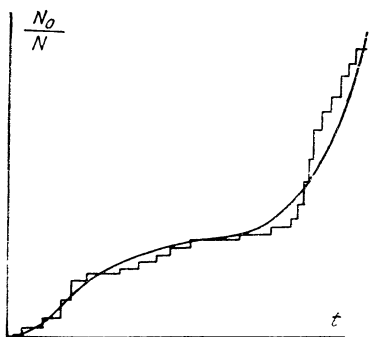


Рис. 25. Эмпирическая кривая накопленного числа отказов

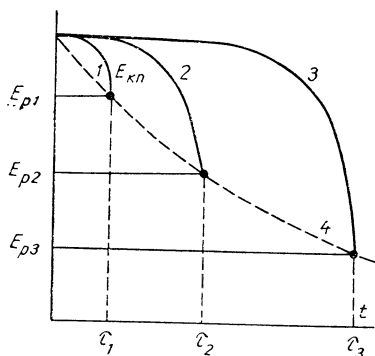


Рис. 26. Кратковременная (1, 2, 3) и длительная (4) электрическая прочность конденсатора в зависимости от времени и рабочей напряженности электрического поля

При электрическом пробое сильное электрическое поле порождает интенсивный разгон носителей заряда и ионизационные процессы, лавинообразно увеличивает проводимость диэлектрика.

Тепловой пробой связан с уменьшением сопротивления диэлектрика и ростом t_{qd} под влиянием нагрева его в электрическом поле, что приводит к дальнейшему увеличению нагрева вплоть до его термического или электрического (электротепловой пробой) разрушения.

Электрохимический пробой возникает при длительном воздействии напряжения, когда под влиянием электрохимических процессов, происходящих в диэлектрике под воздействием электрического поля, диэлектрик разрушается, его электрическая прочность снижается. Этот вид пробоя чаще всего наблюдается при повышенной температуре и высокой влажности, а также под воздействием постоянного или инфранизкочастотного переменного напряжения.

Как уже указывалось, электрическое поле конденсатора неоднородно, концентрируется в отдельных точках, и пробой наступает раньше всего в наиболее слабом месте. Пробою предшествуют медленные изменения структуры диэлектрика, связанные с ионизационными процессами (частичными разрядами), химическими или электрохимическими процессами (разложение диэлектрика, пропитывающей жидкости и т. д.).

Эти изменения в диэлектрике, называемые его старением, снижают его электрическую прочность, что ведет к электрическому пробую. Процессы старения протекают с различной скоростью в зависимости от температуры и уровня приложенного к конденсатору напряжения. Принято различать кратковременную электрическую прочность $E_{кп}$ или такую напряженность поля, при которой наступает пробой при быстром подъеме напряжения, и длительную электрическую прочность, определяемую напряженностью, которую выдерживает диэлектрик в течение заданного промежутка времени. Очевидно, что кратковременная электрическая прочность вследствие процессов старения убывает с течением времени и тем быстрее, чем больше электрическая и тепловая нагрузки конденсатора.

Изменение во времени кратковременной электрической прочности при различных напряжениях на конден-

саторе графически показано на рис. 26. Точками отмечены моменты пробоя конденсатора, т. е. моменты, когда воздействующая рабочая напряженность равна $E_{\text{кп}}(t)$, пунктиром — зависимость длительной электрической прочности от времени. Эта зависимость называется кривой жизни конденсатора, поскольку устанавливает связь между временем жизни и воздействующей напряженностью.

Кривая жизни различна при постоянном, синусоидальном и импульсном напряжениях, так как от вида напряжения зависят процессы электрохимического ионизационного и термического старения, а от условий охлаждения (температура охлаждающей среды, принудительный обдув и т. п.) — скорость термического старения.

На ход кривой жизни воздействуют и внешние факторы: радиация, облегчающая возникновение ионизационных процессов; влага, ускоряющая электрохимические процессы и увеличивающая тепловыделение; недопропитка, ускоряющая ионизационное старение, и т. д.

Другой распространенный вид отказа — потеря конденсатором емкости, может быть связан, например, с электрохимическим разрушением металлизированных обкладок, перегоранием встроенного предохранителя, выгоранием контактного узла. Последнее имеет место при больших импульсных токах, когда почти вся энергия выделяется в малом объеме контактного узла и значительно повышает его температуру.

17. От чего зависит долговечность конденсаторов

Основной причиной наступления отказов конденсаторов являются необратимые постепенные или достаточно быстрые изменения, происходящие в диэлектрике (старение материала) или в других элементах конструкции конденсатора (обкладках, контактном узле и т. д.). Старение диэлектрика в зависимости от процесса, вызывающего эти изменения, называют: ионизационным, если разрушение связано с частичными разрядами; термическим, если определяющим в химических реакциях, происходящих в диэлектрике, явля-

ется его температура; электрохимическим, когда на ход химических реакций влияет электрическое поле.

Эти механизмы старения часто возникают одновременно и взаимно влияют друг на друга. Однако в зависимости от конструкции конденсатора, характера электрической нагрузки один из них оказывается преобладающим. Например, у конденсаторов с органическим пленочным диэлектриком характерным видом старения является ионизационное, так как, с одной стороны, их трудно качественно пропитать, а с другой — пленочный диэлектрик сильнее бумажного разрушается под действием частичных разрядов.

В бумажных конденсаторах, работающих при низких частотах напряжения, преобладает ионизационный механизм старения, тогда как при повышенных частотах и температурах — термический.

В отсутствие частичных разрядов и при умеренной температуре основным видом старения является электрохимическое, особенно при постоянном или низкочастотном напряжении, когда в диэлектрике и у обкладок происходят химические реакции, развитию которых способствует электрическое поле. Электрохимическое старение ускоряется при наличии влаги, продуктов разложения диэлектрика, пропитки от термических и ионизационных процессов. У чисто пленочных конденсаторов, имеющих большое объемное сопротивление и высокую степень однородности диэлектрика, это старение ослаблено. Но при высоких температурах возникают термоокислительные и гидролитические процессы разрушения пленки, появляются усадка и текучесть пленки, что создает механические напряжения и опасность закорачивания обкладок.

После диэлектрика самые слабые элементы конденсатора, подверженные старению, — его обкладки и контактный узел. В конденсаторах с металлизированными обкладками повышенные температуры приводят к перерождению кристаллической структуры слоя металлизации, что вызывает увеличение сопротивления обкладок и переходного сопротивления контактного узла. У фольговых конденсаторов с вкладными выводами секций старение приводит к увеличению переходного сопротивления между вкладышем и обкладкой, вызванного термоокислительными процессами.

Кроме конструктивных особенностей на вид и скорость старения конденсаторов влияют внешние условия (температура охлаждающей среды, влажность, вибрация) и электрическая нагрузка конденсатора (амплитуда напряжения, его частота, величина постоянной составляющей, скважность импульсов, амплитуда тока, действующее значение тока конденсатора и т. д.). При высокой частоте ослабляется электрохимическое старение, при низкой и наличии постоянной составляющей оно усиливается.

Ионизационному старению способствуют повышение частоты воздействующего напряжения и увеличение скорости изменения напряжения при импульсных формах. Особенно сильно на интенсивность ионизационного старения влияет напряжение: при превышении уровня ионизации его интенсивность растет пропорционально напряжению в 5—7-й степени в зависимости от вида диэлектрика. На скорость термического старения воздействует выделяющаяся в конденсаторе энергия, зависящая от формы напряжения, его амплитуды и частоты.

Тепловыделение в металлических частях конденсатора зависит от тока конденсатора и его частоты. Повышение температуры выводов и обкладок ускоряет термическое старение контактных узлов, обкладок и диэлектрика, непосредственно примыкающего к перегретым металлическим частям. При импульсных токах большой скважности отдельные части конденсатора могут нагреваться до температур, значительно превышающих среднее значение. Этот локальный перегрев ускоряет старение, выгорание металлизированных обкладок вблизи контактного узла, отслаивание шпопировки и даже пробой диэлектрика вблизи места перегрева.

В процессе старения происходят ускоряющие его изменения. Так, термоокисление контактного узла увеличивает его сопротивление и тем самым тепловыделение. Разрушение диэлектрика, накопление в нем продуктов разложения повышают его $\operatorname{tg} \delta$, что увеличивает тепловыделение и ускоряет старение. Именно это ускорение часто определяет рост интенсивности отказов в конце срока службы конденсаторов (см. рис. 24).

Поскольку на старение влияют температурный режим и характер нагрузки конденсатора, его срок служ-

бы — календарная продолжительность эксплуатации до отказа — может быть различным в зависимости от того, сколько времени на протяжении этого периода конденсатор не работал, т. е. не подвергался нагрузке. Потенциальная (возможная) продолжительность непрерывной эксплуатации конденсатора называется его ресурсом. Конденсатор как бы обладает запасом «жизненных сил», которые может «тратить» экономно (при режимах, затрудняющих или ослабляющих старение), или, наоборот, «прожигать» жизнь (при интенсивных нагрузках).

Существуют полуэмпирические модели долговечности, устанавливающие связь между временем жизни конденсатора и параметрами воздействующего напряжения, температурой (рис. 27). Эти модели строятся исходя из математического описания механизма старения с экспериментальным уточнением отдельных параметров. Например, при описании термического старения часто используется закон Аррениуса, согласно которому скорость химических реакций, вызывающих старение, изменяется в два

раза с изменением температуры на 10°C . Практически у разных диэлектриков имеются отклонения от закона Аррениуса (двойное изменение ресурса конденсаторов происходит при изменении температуры на $8\text{--}12^{\circ}\text{C}$), что требует экспериментального уточнения зависимости ресурса от температуры. Эксплуатационные факторы по-разному влияют на ре-

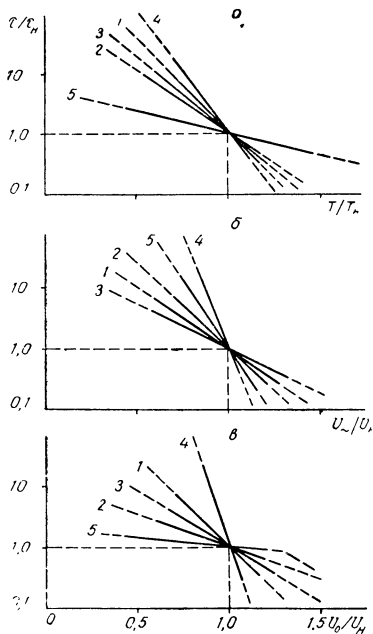


Рис. 27. Качественные зависимости ресурса конденсаторов с бумажным диэлектриком (1), пленочным (2), бумажно-пленочным с жидкой пропиткой (3), электролитических (4) и керамических конденсаторов (5) от температуры (а), переменного (б) и постоянного (в) напряжений

курс различных конденсаторов (см. рис. 27). При этом в зависимости ресурса от воздействующего фактора (например температуры) могут наблюдаться «переломы», свидетельствующие часто об изменении механизма реакций, вызывающих старение.

18. Как и чем обеспечивается надежность конденсаторов?

Чем медленнее стареет конденсатор, тем дольше он «живет». А скорость старения, как уже видели, зависит от условий эксплуатации, главным образом от температуры и электрической нагрузки. Стало быть, уменьшая напряжение на конденсаторе, например, включая ряд конденсаторов последовательно или используя конденсаторы с большим значением номинального напряжения, можно снизить скорость всех видов старения, так как при этом уменьшится тепловыделение и температура диэлектрика конденсатора, интенсивность частичных разрядов и скорость электрохимических процессов. Долговечность конденсатора увеличивается, однако для этого приходится повышать габариты, массу, стоимость конденсаторов. Следовательно, для конденсаторов необходимо выбирать такие электрические нагрузки или, наоборот, для заданной электрической нагрузки выбирать такие типы и номиналы конденсаторов, которые обладали бы минимальной стоимостью или массогабаритными показателями при обеспечении требуемой долговечности или ресурса. Для проектирования электротехнических и электронных устройств необходимо иметь работоспособные модели старения или долговечности конденсаторов, о которых шла речь в предыдущем разделе.

При наличии таких моделей можно определить долговечность при «любых» нагрузках. Но важно, чтобы изменение нагрузки не влияло на механизм старения (требование сохранения автомодельности процессов старения). Такая возможность используется для определения параметров моделей долговечности по результатам ускоренных испытаний. Последние выполняются с повышением по отношению к номинальным электри-

ческих и тепловых нагрузок в течение небольшого промежутка времени. Например, если при температуре 70°C и напряженности электрического поля 30 В/мкм конденсаторы с полипропиленовым диэлектриком способны проработать 10^5 часов (около 10 лет), то при соответственно 120°C и 48 В/мкм срок их жизни сокращается до сотен часов.

Электрические и тепловые режимы, при которых должен работать конденсатор, выбирают исходя из требуемого срока службы. Если конденсатор устанавливается в аппаратуре, предназначенной для длительной, многолетней эксплуатации, например, на маяке или в подводном кабеле связи, то его режимы облегчаются, и, наоборот, конденсаторы, предназначенные для аппаратуры с коротким периодом эксплуатации, нагружаются по напряжению и теплу значительно больше. Это могут быть различные зонды одноразового пользования, бортовое оборудование ракет и т. д. Таким образом, срок жизни конденсатора должен быть согласован со сроком жизни установки, где он используется. Если это не соблюдается, то либо конденсатор недоиспользуется по своим возможностям (чаще всего при завышенных запасах прочности), что ухудшает экономические и массогабаритные показатели, либо, что более опасно и приводит к значительным потерям, конденсатор перегружается и становится слабым местом установки, главной причиной отказов.

Поскольку наступление отказа — событие случайное (момент возникновения отказа случаен) и его вероятность тем меньше, чем ниже интенсивность отказов $\lambda(t)$ и, следовательно, больше срок службы (или ресурс). Поэтому конденсаторы с большим сроком службы (или ресурсом) обычно обладают большей надежностью, чем конденсаторы с меньшими ресурсами. Это используется при создании устройств с гарантированной надежностью.

Важной задачей является обнаружение потенциально ненадежных конденсаторов — таких, которые могут отказать первыми. Полный входной контроль, т. е. проверка по всем показателям всех конденсаторов перед их установкой в аппаратуру, позволяет исключить высокую интенсивность отказов в начальном периоде

эксплуатации, связанную с дефектами, приобретенными в процессе изготовления и хранения*.

При эксплуатации происходит старение конденсатора, отражающееся на значениях его параметров: сопротивлении обкладок, контактного узла, выводов, величине емкости, тангенсе угла диэлектрических потерь; причем изменения касаются не только самих параметров, но и их температурных и частотных зависимостей. Поэтому диагностика конденсаторов основывается на замере при эксплуатации их основных параметров и характеристик. Чем ближе эти значения к граничным, тем более вероятен отказ конденсатора в ближайшее время. Однако проведение таких измерений — сложная техническая задача, оправданная лишь для особо ответственных применений конденсаторов.

* В конденсаторах могут быть дефекты, которые не обнаруживаются с помощью стандартных измерений их параметров. Поэтому в последнее время интенсивно разрабатываются методы интегральной диагностики, позволяющие судить об «общем состоянии» конденсатора и производить отбраковку потенциально ненадежных конденсаторов.

Глава IV

КОНДЕНСАТОРЫ ВОКРУГ НАС

19. Природные конденсаторы

Рассматривая более широко способность накапливать энергию в электрическом поле, к конденсаторам можно отнести такие природные системы, как Земля, атмосфера, водяные и пылевые облака и т. д.

Самый грандиозный по масштабам природный конденсатор — это система Земля — атмосфера*. Заряд этого конденсатора составляет около $3 \cdot 10^5$ Кл, а напряжение — 250 000 В. Величина его емкости, рассчитанная по этим данным, равна примерно одной фараде.

Расчетная величина тока утечки этого колоссально-го конденсатора близка к 2000 А. Несмотря на такой большой ток (при 1 А переносится заряд в 1 Кл за одну секунду), заряд Земли практически неизменен благодаря постоянной подзарядке ее из атмосферы.

Почему же мы не ощущаем действия электрического поля этого конденсатора? Во-первых, органы чувств человека способны реагировать на электрические поля слабой интенсивности только косвенно, особенно если эти поля неизменны во времени. Мы можем, например, услышать шумы, шипение, потрескивание, которые сопровождают интенсивные ионизационные процессы при большой напряженности поля — коронный разряд. Его, в частности, можно услышать вблизи высоковольтных линий электропередач при повышенной влажности воздуха.

Напряженность электрического поля Земли у ее по-

* Существует предположение, что малопроводящие электрический ток верхние слои земной коры толщиной 5—10 км составляют диэлектрик еще одного «земного» конденсатора, обкладками которого являются поверхностные слои и обладающие повышенной электропроводностью глубинные слои. Таким образом, фактически имеется несколько глобальных природных конденсаторов, если учесть, что ионосфера и атмосфера образуют еще один гигантский конденсатор.

верхности (с высотой уменьшается и колеблется от 100 В/м при хорошей погоде до 1000 В/м при грозовой) существенно меньше, чем на коронирующих проводах. Такую же примерно напряженность поля создает трамвайный провод*.

Во-вторых, за время эволюционного развития человек «привык» к некоторой средней напряженности поля и его реакции на электрическое поле могут быть связаны только с колебаниями напряженности этого поля.

Какова же роль электрического поля Земли в жизни живого? Рядом исследований выявлено влияние его на скорость роста и размеры растений: в отсутствие поля или при его полярности, противоположной естественной, развитие их угнетается. Можно предположить, что бурный рост и гигантские размеры растительности на Земле в определенные этапы ее развития наряду с большой влажностью, повышенной температурой, насыщенностью атмосферы и воды «естественными» удобрениями — солями азота и т. д. были обусловлены усилениями электрического поля Земли.

Энергия электрического поля нашей планеты невелика: около 10^7 кВт·ч. Такое количество энергии современная электростанция вырабатывает примерно за десять часов работы**.

Конечно, в результате атмосферных процессов, а также ионизирующего действия космической и солнечной радиации электрическое поле Земли, как источник энергии, возобновляется. Но энергия его распределяется по очень большому объему и поэтому плотность ее чрезвычайно низка — около 10^{-7} Дж/дм³, что обуславливает низкие мощности и трудность «съема» энергии при попытке ее использования. Более скромные по масштабам, но заметнее другие природные конденсаторы — накопители электрических зарядов — облака. Особенность их в том, что электрическая энергия «вырабатывается» в них самих: объемные заряды образуются вследствие деления капель воды, их превращения в кристаллы льда, трения этих кристаллов и т. д.

* Напряженность поля под высоковольтными линиями электропередач переменного тока составляет от сотен до 10 000 В на метр.

** Годовая выработка электроэнергии в СССР в 1977 году составила 1115 млрд. кВт·ч., или более чем в 10^4 раз больше энергии электрического поля Земли.

Всякое облако несет определенный заряд, однако особенно он значителен у грозовых облаков. Для них характерна вытянутая вверх форма, образующаяся в результате действия восходящих потоков теплого воздуха. Верхняя часть облака иногда достигает высоты 15—20 км. Она состоит из мельчайших кристалликов льда, заряженных положительно (рис. 28, а). Средняя часть облака состоит из переохлажденных* мелких капелек воды, заряженных отрицательно. Нижний, сравнительно тонкий слой, имеющий более крупные капли обычной (непереохлажденной) воды, приобретает положительный заряд. Бывают облака, у которых заряды образуют систему (рис. 28, б). Они обычно находятся на больших высотах, чем облака с системой зарядов, изображенной на рис. 28, а.

В результате электростатической индукции на поверхности Земли под облаком концентрируются отрицательные и положительные заряды. Так как грозовых облаков может быть несколько, то возникает сложная система зарядов и соответственно эквивалентных конденсаторов, показанная для двух грозовых облаков (рис. 29). Изолятором в этих конденсаторах служит воздух. Под действием электрического поля зарядов свободные электроны, всегда имеющиеся в некотором

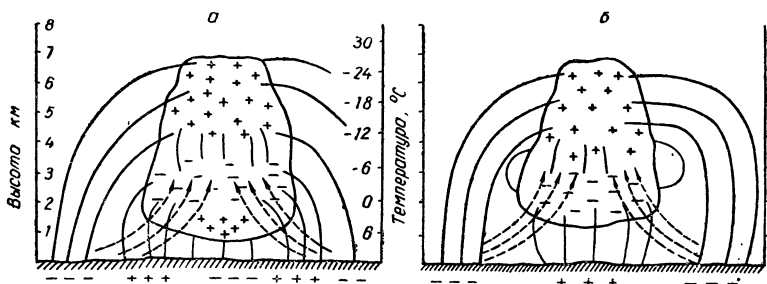


Рис. 28. Электростатические заряды («плюс» и «минус») и силовые линии электрического поля (сплошные линии) в грозовом облаке и восходящие потоки воздуха (пунктирные линии). Облако с тремя (а) и двумя (б) областями зарядов

* Переохлажденная вода находится в жидком состоянии при температурах, доходящих до нескольких десятков градусов ниже нуля.

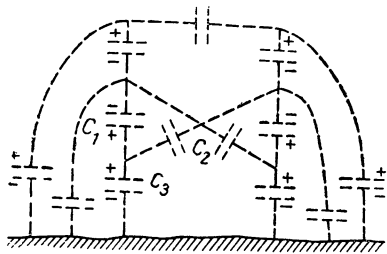


Рис. 29. Электрическая схема, состоящая из конденсаторов сосредоточенной емкости, эквивалентная системе двух грозовых облаков с тремя областями зарядов

линейную молнию*. По узкому каналу молнии за короткий промежуток времени (десятитысячные доли секунды) со скоростью до 15 000 км/с протекает импульс тока в 100 000 А и более. В результате заряды в части облака нейтрализуются и перераспределяются, подготавливая условия для пробоя других конденсаторов (см. рис. 29).

Напряжение между «обкладками» таких природных конденсаторов при пробое достигает миллионов вольт. Имеющиеся в литературе данные позволяют оценить емкость и энергию этих природных конденсаторов. Полагая силу тока разряда молнии около нескольких десятков тысяч ампер, при его длительности порядка сотни микросекунд нейтрализуется заряд, равный нескольким кулонам. Тогда емкость и энергия такого конденсатора ориентировочно составят около 10^{-8} Ф и 10^8 Дж**. Энергия выделяется в канале молнии в основном в виде тепла, что порождает из-за быстрого нагрева и расширения воздуха (до нескольких десятков тысяч градусов) сильный звук — гром. Мощность одного грозового разряда достаточно велика из-за малого времени выделения энергии и составляет в среднем порядка 10^9 кВт, а предельно достигнутая уже мощность искусственно разряда — 10^8 кВт.

* При пробое C_1 наблюдается молния внутри одного грозового облака, при пробое C_2 — молния между облаками, а при C_3 — между облаком и Землей.

** Этой энергии хватило бы для электроснабжения одной городской квартиры в течение примерно одной недели.

Специалисты подсчитали, что ежедневно на Земле происходит около нескольких десятков тысяч гроз и возникают миллионы молний, или около десятка молний в секунду. В этом можно легко убедиться, прислушавшись к треску, раздающемуся в радиоприемнике на длинных и средних волнах; он свидетельствует о грозовых разрядах в радиусе сотен километров от места его нахождения. Трудности использования энергии грозовых облаков почти те же, что и описанные выше для поля Земли. К тому же такой источник энергии был бы нестабильным по вполне понятным причинам*.

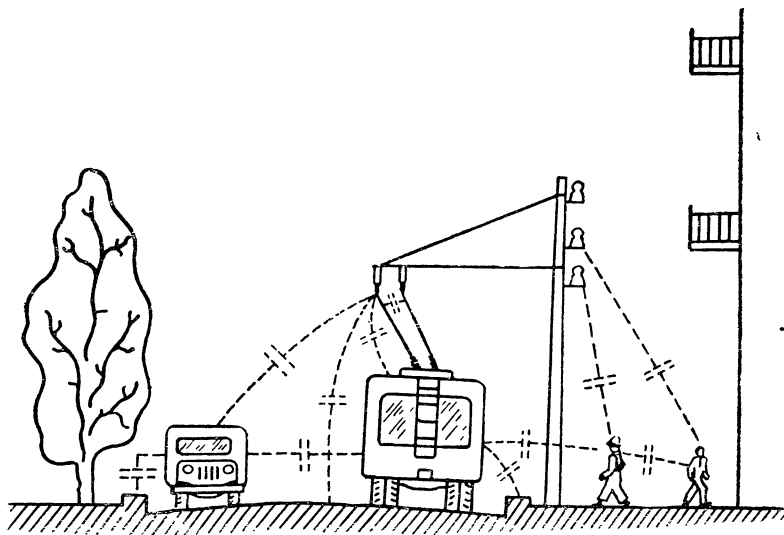
20. «Естественные» конденсаторы

Проводящие или полупроводящие ток предметы или тела часто образуют с землей, а также друг с другом системы, способные накапливать электрические заряды, т. е. обладающие емкостью. Следовательно, мы живем в мире «естественных» конденсаторов**. Какими же свойствами должны обладать тела или предметы, чтобы они могли быть «естественными» конденсаторами? Какова их характеристика и роль? Какой источник энергии заряжает их? Какой характер зарядов и как долго они удерживаются такими конденсаторами? Возникают эти и множество других вопросов. Некоторые из них приводят в затруднение даже специалистов.

Обязательными условиями образования «естественного» конденсатора является наличие достаточно хорошей проводимости у тел или предметов, а также изоляции между ними и землей. Емкость таких конденсато-

* Попытка использовать атмосферное электричество как источник энергии для ускорения протонов была предпринята в Швейцарии в 30-х годах с помощью стальной сетки, натянутой в горах между скалами. Однако такой ускоритель действовал только во время сильных гроз и был практически неуправляемым. Работу прекратили после гибели одного из экспериментаторов от удара молнии.

** В буквальном смысле слова конденсаторы, образующиеся в результате деятельности человека, не являются естественными, т. е. природными. Однако такие конденсаторы не создаются человеком специально. В отличие от «искусственных» конденсаторов, обладающих сосредоточенной емкостью, они имеют распределенную емкость.



Р и с. 30. Примеры «естественных» конденсаторов на улице города

ров зависит от размеров предметов или тел и расстояния между ними. Чем больше размеры и меньше расстояния, тем больше емкость. «Естественные» конденсаторы, которые мы не замечаем, находясь на улице, но которые реально существуют и могут быть обнаружены, изображены на рис. 30. Так, в сухую погоду люди в синтетической одежде при рукопожатии могут ощутить сильный разряд, проявляющийся как укол и сопровождающийся хорошо слышимым треском*. Это пробивается конденсатор, обкладками которого являются сами люди, а диэлектриком — воздух между ними. При сухой погоде сопротивление изоляции (воздуха и обуви) велико и способствует накоплению зарядов, образующихся при электризации в результате трения синтетических материалов. Напряжение, развивающееся на таком «естественном» конденсаторе вследствие накопления зарядов, может достигать до нескольких тысяч

* Это явление не следует путать с явлением увеличения проводимости изоляции силовых цепей в результате ее увлажнения, из-за чего люди ощущают неприятное воздействие тока утечки, прикасаясь, например к троллейбусу, при входе или выходе.

вольт. Однако емкость его достаточно мала — около десятка пикофарад.

Особенно сильный разряд возникает, когда две обкладки такого конденсатора заряжены противоположными по знаку зарядами, так как разность потенциалов при этом удваивается. Впрочем, такие эффекты довольно редки и вызывают лишь легкое потрясение. Более опасен разряд конденсатора, образованный автомобилем, металлические части которого являются одной из обкладок, а второй обкладкой служит земля. Шины из нетокопроводящей резины — это изолятор. В результате трения шин и других процессов на автомобиле может накопиться электрический заряд. Емкость такого конденсатора составляет около сотни пикофарад, а величина напряжения, до которого он может зарядиться, — десятки тысяч вольт. Энергия искры при пробое такого конденсатора (пробой может возникнуть по поверхности шин на землю или по воздуху на другой, близко находящийся автомобиль) достаточна для воспламенения и взрыва паров бензина или других веществ. Вот почему машины-бензовозы снабжают цепочками, соприкасающимися с землей, по которым заряды «стекают» в землю.

Легковые автомобили для тех же целей, а также для ликвидации «уколов» — разрядов на человека, имеют ленты токопроводящей резины. Известно, что статическое электричество и разряды «естественных» конденсаторов доставляют много неприятностей на предприятиях со взрывоопасной средой (шахты, мукомольные предприятия, химические производства и т. д.).

Часто безобидные в общем-то разряды «естественных» конденсаторов могут ухудшать качество продукции или даже приводить ее в негодность. Некоторые полупроводниковые приборы, например, очень чувствительны к таким разрядам и полностью выходят из строя, если не принять специальные меры перед тем, как взять их в руки. Известны случаи, когда пробой «естественного» конденсатора, образованного операторами в синтетической одежде, вызывали сбои в работе электронных вычислительных машин. Причина сбоев не сразу была установлена.

Величины зарядов, и особенно емкостей и напряжений «естественных» конденсаторов, не постоянны: они

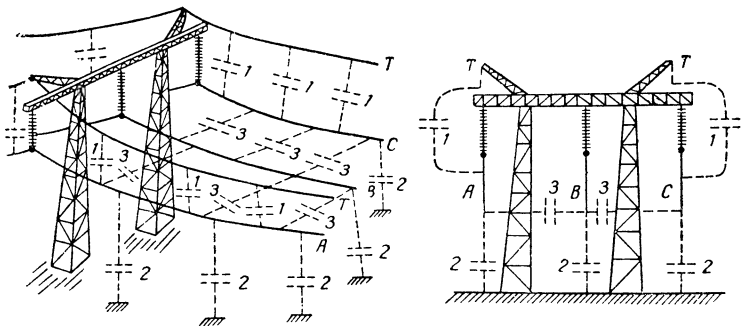
изменяются по мере перемещения предметов или тел, образующих эти конденсаторы, вследствие изменения расстояний между ними, а также зависят от состояния атмосферы, влияющего на сопротивление изоляции и накопление зарядов.

«Естественные» конденсаторы получают заряды не только в результате электризации, когда на них возникает постоянное по знаку напряжение. Через них может протекать и переменный ток, если одной из обкладок является проводник, находящийся под переменным напряжением. Например, провода электрического питания и человек в комнате образуют конденсатор, емкость которого очень мала — единицы и десятки пикофарад в зависимости от расстояния между ними. Через этот «естественный» конденсатор протекает переменный ток частотой 50 Гц, величина которого составляет миллионные доли ампера, так как сопротивление конденсатора такой емкости на частоте 50 Гц равно десяткам и сотням миллионов Ом, а напряжение сети 220 В. Токи такой малой величины человек совершенно не ощущает, но они легко обнаруживаются, если прикоснуться ко входу усилителя низкой частоты радиоприемника, магнитофона, телевизора и т. д. При этом слышен характерный гул или, как говорят специалисты и радиолюбители, «фон». Эксперимент позволяет ориентировочно оценить величину емкости конденсатора «человек — электропровода», учитывая, что этот конденсатор и входное сопротивление усилителя образуют делитель, и зная чувствительность усилителя. Еще проще эту оценку можно осуществить, используя ламповый вольтметр. Величина емкости

$$C = \frac{(1 \div 3)}{2\pi \cdot 50 \cdot 220 \cdot 500 \cdot 10^3} \approx 30 \div 90 \text{ пФ} ,$$

где $(1 \div 3)$ — напряжение в вольтах, которое обычно показывает ламповый вольтметр, если коснуться его «входа» рукой.

Сильно проявляется действие «естественных» конденсаторов в технике проводной связи и в высоковольтных системах передачи электрической энергии. Электрические провода, разделенные воздухом или другим изолятором (диэлектриком), образуют конденсатор, емкость которого «распределена» по длине и зависит



Р и с. 31. «Естественные» конденсаторы распределенной емкости воздушной линии электропередач высокого напряжения:

1 — емкость между защитным тросом (Т) и проводами высокого напряжения (А, В, С); 2 и 3 — емкости проводов высокого напряжения на землю и между проводами высокого напряжения соответственно

от расстояния между проводниками, сечения и длины проводов, а также от характеристик разделяющих их диэлектриков. Одновременно каждый из проводов образует конденсатор распределенной емкости на землю (рис. 31). Так, воздушные линии электропередач высокого напряжения 110—400 тыс. вольт вследствие значительного расстояния между проводами и низкой диэлектрической проницаемости воздуха имеют удельную емкость между проводами порядка 10^{-8} Ф/км и несколько меньшую на землю. Электрические кабели имеют в сотни раз большую удельную емкость благодаря значительно меньшему расстоянию между его жилами и большей диэлектрической проницаемости их изолирующего материала.

Совместно с индуктивностью линии, которая также является распределенной, наличие «естественных» конденсаторов приводит к возникновению в линиях волновых процессов (отражению, преломлению и др.) при различных возмущениях, например, при ударе молнии, отключении или подключении трансформаторов и т. д. Эти процессы в свою очередь обуславливают появление на линии перенапряжений, опасных для ее изоляции и подключенного к ней оборудования.

Однако и без возмущений емкость и индуктивность линий приводят к неравномерному распределению напряжения вдоль линии, особенно сильному, когда линия

ненагружена. Первый, но не последний печальный опыт возникновения и проявления этих явлений люди приобрели еще в конце XIX века, когда электротехник Феранти в Лондоне проводил эксперименты с передачей электрической энергии на переменном токе по длинному кабелю. Кабельная изоляция вследствие резонансных явлений не выдерживала возникающего на холостом ходе напряжения и пробивалась, несмотря на все большую ее толщину, которую применял исследователь. Выход из критической ситуации предложил Уильям Томсон*: подключить на конце кабеля реактор — катушку индуктивностей, — который «поглощал» бы избыточную зарядную мощность емкости кабеля и этим снижал напряжение.

Влияние емкости ЛЭП на характер распределения напряжения вдоль линии, вредное на холостом ходе, т. е. при отсутствии нагрузки, становится полезным, когда линия имеет активную и особенно активно-индуктивную нагрузку**. Тогда распределенные емкости компенсируют индуктивное сопротивление ЛЭП, благодаря чему уменьшается потеря напряжения. Величины зарядных токов длинных высоковольтных ЛЭП могут достигать единиц и десятков ампер. Эти довольно значительные токи протекают через «естественные» конденсаторы ЛЭП.

21. Конденсаторы-«паразиты»

Эти конденсаторы также являются «естественными», но выделены из-за их отрицательной роли в работе электронных и электротехнических устройств.

* Уильям Томсон (1824—1907) — выдающийся английский физик. За исключительные заслуги в различных областях науки, в частности электротехники, был удостоен титула лорда (лорд Кельвин). Им в 1853 году получена формула для вычисления периода собственных колебаний идеального электрического контура: $T = 2\pi \sqrt{LC}$ введено понятие абсолютной температуры тел (шкала Кельвина), выполнено много исследований в области термодинамики, гидродинамики, астрофизики, созданы основы теории проводной связи.

** В высоковольтных дальних линиях электропередач переменного тока для выравнивания напряжения применяют сложные системы, состоящие из реакторов (катушек индуктивности на большие токи и напряжения) и источников реактивной мощности — синхронных компенсаторов или батарей конденсаторов, располагаемых через определенные интервалы вдоль линии.

Если емкость между проводами высоковольтных ЛЭП играет двойную роль, то та же емкость проводных линий связи только вредит их работе. Она, например, обуславливает волновые процессы, разную скорость и передачу амплитуды при прохождении сигналов разных частот, т. е. в конечном итоге приводит совместно с другими паразитными параметрами линии (индуктивностью и активным сопротивлением) к искажению сигналов. Паразитная емкость между отдельными каналами вызывает взаимное влияние канала на канал. Число конденсаторов-«паразитов» необычайно велико, так как любой элемент, будь то транзистор, резистор, диод, трансформатор, дроссель, лампа и т. д., обладает несколькими паразитными емкостями (рис. 32). Даже микроминиатюрные элементы, на которых базируется современная электронная техника, имеют различные паразитные параметры, в том числе емкости. Это обусловлено тем, что элементы и соединяющие их проводники в целом, образующие электронные и электротехнические устройства, изготавливаются из проводниковых, полупроводниковых и диэлектрических материалов. А там, где два проводника разделены диэлектриком, авто-

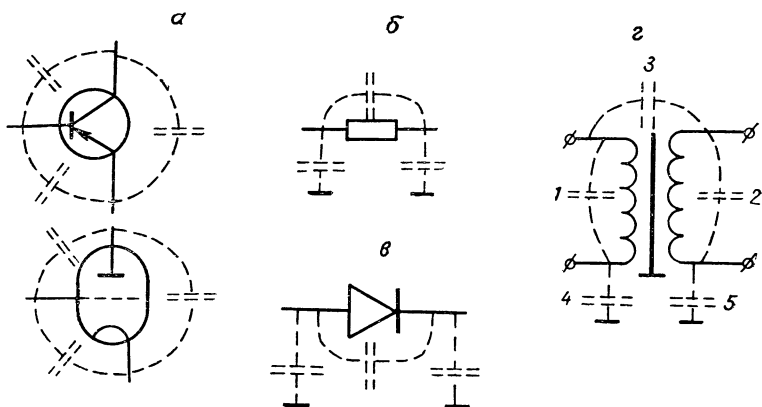


Рис. 32. Паразитные емкости некоторых элементов электронных схем:

а — ламп и транзисторов (межэлектродные емкости); б — резисторов; в — диода; г — трансформатора. 1 и 2 — емкости первичной и вторичной обмоток; 3 — межобмоточная емкость; 4 и 5 — емкости первичной и вторичной обмоток на землю

матически образуется конденсатор. Его емкость, как уже упоминалось, зависит от размеров (в основном от площади) проводников, расстояния между ними и вида диэлектрика. Для большинства электронных элементов эта емкость сравнительно невелика — от сотых долей до сотен пикофард. Емкость конденсаторов-«паразитов» электротехнических машин и аппаратов (двигателей, генераторов, трансформаторов, выключателей и т. д.) значительно больше и может достигать долей микрофарды.

Конденсаторы-«паразиты» не в любых условиях проявляют свое отрицательное влияние на работу элемента или устройства. Все определяется скоростью изменения токов и напряжений в схеме или частотой этих величин. При постоянном напряжении и на низких частотах конденсаторы-«паразиты» не влияют на работу схем, так как их сопротивление больше, чем сопротивление самого элемента. Однако при частотах, на которых эти сопротивления соизмеримы, конденсаторы-«паразиты» снижают* сопротивление элементов, вызывают изменение фазы, искажают сигналы и могут привести к неправильной работе и даже полной неработоспособности устройства. Например, катушка индуктивности — дроссель, которая должна препятствовать протеканию токов высокой частоты, из-за паразитных емкостей может не выполнить своей функции выше частоты (f_p) первого собственного резонанса катушки индуктивности (рис. 33).

Впервые конденсаторы-«паразиты» активно «проявили» себя на заре ламповой радиотехники. Исследователи обнаружили, что с повышением частоты сигнала усиление электронной лампы падало, затем лампа вообще переставала усиливать. Одной из причин этого явления были межэлектродные емкости лампы (см. рис. 32). Стремление увеличить коэффициент усиления электронных ламп и повысить их мощность приводило к уменьшению расстояний между электродами и увеличению их площадей. А это как раз те условия, при которых растет емкость конденсатора-«паразита». Поэтому

* Вследствие резонансных явлений общее сопротивление в некоторых случаях может возрастать, а при частотах выше резонансной — падать. Резонансов с разным характером изменения общего сопротивления может быть несколько.

разработчикам электронных ламп приходилось принимать компромиссные и различные оригинальные решения, направленные на снижение внутренних паразитных межэлектродных емкостей.

Так, в генераторных лампах водяное охлаждение анода позволило резко снизить его размеры, а следовательно, и межэлектродные емкости. Появились миниатюрные «пальчиковые» и другие виды ламп, обладающие меньшими паразитными емкостями. Кроме собственных паразитных емкостей элементы в схеме имеют паразитные емкости на землю, образуют паразитные емкостные связи непосредственно друг с другом. Совместно с паразитными емкостями соединительных проводников все это составляет паразитную емкость монтажа.

Конденсаторы-«паразиты» (элементов, монтажных проводников и т. д.) приводят к появлению в устройствах паразитных связей, которые могут вызвать неже-

лательные изменения характеристик устройства. В некоторых неблагоприятных случаях (неудачный монтаж, большой коэффициент усиления и т. д.) усилительное устройство может самовозбудиться, т. е. начать самопроизвольно генерировать (вырабатывать) сигналы. В этом случае качество усиления резко ухудшается. Паразитные связи могут привести к самовозбуждению генераторов не на той частоте, на которой они должны работать. Возникают перегрузки элементов схем, тогда как колебания на той частоте, на которую настроена схема, либо отсутствуют, либо становятся сильно искаженными.

Конденсаторы - «паразиты» отрицательно влияют и

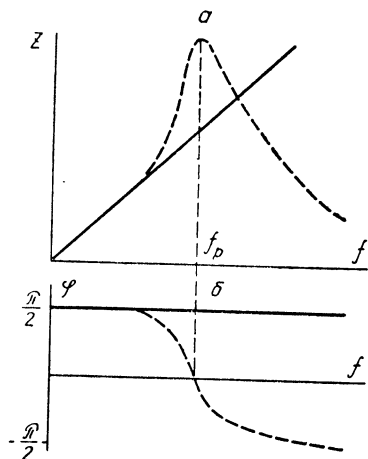
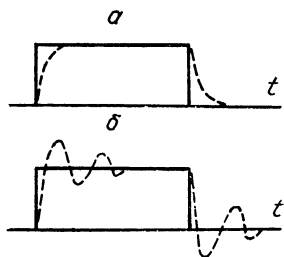


Рис. 33. Зависимость полного сопротивления реальной катушки индуктивности (а) (пунктирная линия), идеальной (сплошная линия) и сдвига фаз между током и напряжением в ней (б) от частоты при наличии паразитной емкости обмотки



Р и с. 34. Искажение (пунктирные линии) прямоугольного импульса при прохождении цепи, содержащей резистор и «паразитный» конденсатор (а), и цепи, содержащей резистор, индуктивность и «паразитный» конденсатор (б)

на работу импульсных устройств, работающих с быстро изменяющимися сигналами. Эти конденсаторы вызывают искажение импульсов, в частности увеличивают длительность фронтов, обуславливают совместно с индуктивностями возникновение затухающих паразитных колебаний или «звона», как говорят радиолюбители (рис. 34).

Паразитные емкости — серьезное препятствие при генерировании коротких импульсов с крутыми фронтами, которые, в частности, необходимы для работы цифровых вычислительных машин, радиолокаторов, лазеров и т. д. Это связано с тем, что па-

разитные конденсаторы заряжаются от источника конечной мощности, т. е. для их заряда требуется некоторое время.

Конденсаторы-«паразиты» способствуют проникновению и распространению в схеме импульсных помех и наводок, так как при быстро изменяющихся напряжениях эти конденсаторы представляют незначительные сопротивления. Так, через паразитные емкости трансформаторов питания из сети импульсные помехи, возникающие в сети по разным причинам, например в результате выключений нагрузок со значительной индуктивностью, проникают в приборы и вызывают их неправильную работу — сбои, появление ложных импульсов и т. д.

Поэтому с первых дней зарождения радиотехники и электроники инженеры повели борьбу с конденсаторами-«паразитами». Она велась в направлении осуществления рационального монтажа схем с минимальными емкостными связями между «критическими» элементами; уменьшения емкости самих элементов и емкости этих элементов на землю, в основном путем миниатюризации элементов и конструктивными мерами; схемной нейтрализацией действия паразитных связей, которые

не удавалось уменьшить. Например, для снижения паразитных емкостей катушек индуктивностей и трансформаторов наиболее эффективным было следующее.

Рекомендовалось применять магнитные сердечники с наибольшей проницаемостью, например из таких материалов, как пермаллой. Это позволяло получать необходимые величины индуктивностей при малом числе витков, в частности при однослойной намотке. Катушки индуктивностей наматывали следующими способами: с принудительным шагом, «корзиночным», «универсаль» и др. Катушки также секционировались —

разбивались на части. Провод, которым наматывались катушки, был минимально допустимого сечения. В трансформаторах для уменьшения паразитной емкостной связи между обмотками использовались экраны, представляющие собой слой обмотки из провода или незамкнутого витка фольги, который заземляли (рис. 35). Такую же роль играли экранированные проводники монтажа. Разумеется, некоторые из этих мероприятий (применение пермаллоя и другие) осуществлялись не только для снижения паразитной емкости, но и для уменьшения габаритов и массы аппаратуры.

Значительный прогресс был достигнут при появлении и освоении полупроводниковых приборов. Они сами имеют небольшие емкости и позволяют уменьшить размеры других элементов схем благодаря значительно меньшим мощностям, необходимым для их работы. Это позволило разработать аппаратуру на более высокие частоты, с меньшими длительностями импульсов и их фронтов и т. д. Дальнейшее снижение емкостей конденсаторов-«паразитов» и расширение частотного диапазо-

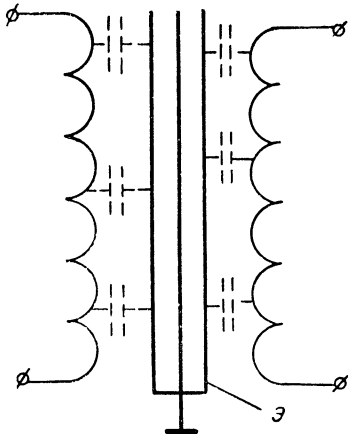


Рис. 35. Способ уменьшения межобмоточной емкости трансформатора путем применения заземленного электростатического экрана (Э)

на работы связано с переходом в 60-е годы на микроэлектронные элементы и схемы.

Конденсаторы-«паразиты» создают трудности не только в маломощных электронных устройствах, но и в мощных электротехнических и энергетических установках и аппаратах. На первый взгляд, этого не должно быть из-за их малой емкости и низкой частоты работы таких устройств. Однако это не так. Как и для высоковольтных ЛЭП, их изоляторы, обмотки электрических машин, трансформаторов, реакторов и других обладают распределенными индуктивностью, емкостью и активным сопротивлением (рис. 36, *а* и *б*).

Эти конденсаторы-«паразиты», действительно не влияющие на работу оборудования на рабочих частотах в установившихся режимах, вызывают колебательные процессы и сопутствующие им перенапряжения при включении или отключении оборудования, а также воздействию на него волн коммутационных (вызванных различными переключениями) или грозовых перенапряжений. Эти волны имеют обычно крутые фронты, вследствие чего в начальный момент распределение напряжения на изоляции аппаратов и машин в основном определяется паразитными емкостями между витками, слоями обмоток и емкостью обмоток на землю (см.

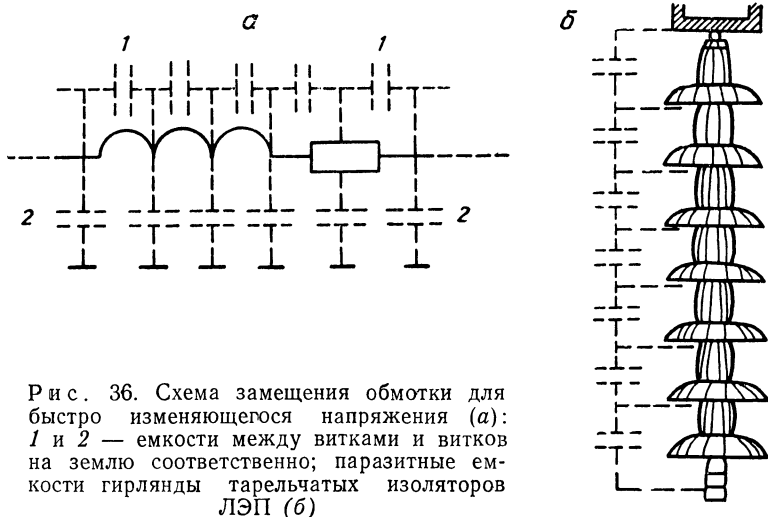


Рис. 36. Схема замещения обмотки для быстро изменяющегося напряжения (*а*): 1 и 2 — емкости между витками и витков на землю соответственно; паразитные емкости гирлянды тарельчатых изоляторов ЛЭП (*б*)

рис. 36). Затем возникают колебания, обусловленные индуктивностями и паразитными емкостями.

В результате этих явлений на изоляцию воздействуют перенапряжения, которые могут представить для нее опасность и должны учитываться при разработке. Здесь можно искусственно увеличить емкость первых витков обмотки, находящихся в наиболее тяжелых условиях, используя различные конструктивные меры, в том числе специальные экраны.

Особые неприятности конденсаторы-«паразиты» доставляют разработчикам высоковольтных силовых полупроводниковых преобразовательных устройств, которые служат для преобразования переменного тока в постоянный (выпрямители), обратного преобразования (инверторы) и других функций. Они используются в системах передачи энергии постоянным током, в мощных электроприводах и т. д. Основным элементом, позволяющим управлять работой этих устройств,— силовой полупроводниковый вентиль с контролируемым моментом включения — тиристор. Особенность преобразовательных устройств — это релейный, или ключевой, режим работы их элементов, который приводит к «обрывам» токов в индуктивных элементах, сопровождающихся возникновением перена-

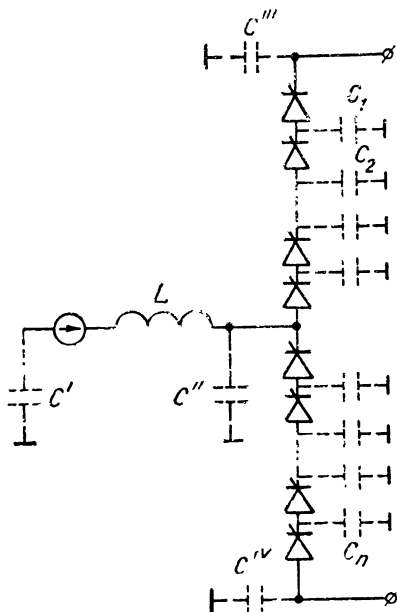


Рис. 37. Схема части силового полупроводникового преобразователя и «паразитные» конденсаторы, присутствующие в ней. C' и C'' — емкости нейтрали и фазы трансформатора на землю соответственно; C''' и C^{IV} — емкости полюсов преобразователя на землю; $C_1, C_2, \dots, C_n$ — емкость внешних элементов на землю

пряжений с большой скоростью изменения напряжения во времени.

Таким образом, то, что в обычных электроустановках — редкость, в силовых полупроводниковых преобразователях — нормальный режим работы, поскольку коммутации (переключения) вентилей в них следуют с частотой сети, а всего за период осуществляется обычно шесть и более коммутаций, т. е. при частоте 50 Гц — триста и более переключений в секунду.

В мощных тиристорных преобразователях с последовательным соединением большого числа вентилей и других элементов на динамическое распределение напряжений в основном влияют конденсаторы-«паразиты», обуславливающие емкостные связи между элементами и элементов на землю (рис. 37). Там, где емкость таких конденсаторов меньше, обычно напряжение выше, т. е. она неравномерно распределяется по цепочке элементов. Вредное влияние этих конденсаторов может быть предотвращено схемно-конструктивным путем, обеспечивающим принудительное более равномерное распределение напряжения.

Глава V

КОГДА, ПОЧЕМУ И НАСКОЛЬКО БЫВАЮТ ОПАСНЫМИ КОНДЕНСАТОРЫ?

Опасность разряда «природного» конденсатора «облако — Земля» известно человечеству давно, и горький опыт научил его борьбе с линейной молнией с помощью молниеотводов*.

22. Чем опасны «естественные» конденсаторы?

Влияние «естественных» конденсаторов на работу оборудования и опасность, которую они подчас создают для него, рассмотрены в разделе 20. Остановимся подробнее на некоторых аспектах опасности, возникающей для жизни человека из-за «естественных» конденсаторов.

Большинство «естественных» конденсаторов имеет незначительную емкость и энергию, в связи с чем они практически безопасны. Их разряд на человека приводит к легкому и мгновенному уколу или потрясению. «Паразитные» емкости катушек индуктивностей и трансформаторов и электрических машин после их отключения от источников питания очень быстро разряжаются на обмотки этих устройств.

Однако некоторые «естественные» конденсаторы не столь безобидны. Так, ненагруженная кабельная линия,

* Молниеотвод в виде заземленного стержня с заостренным концом, укрепляемого на самой верхней точке здания, для защиты от ударов молнией предложил Бенджамен Франклин в 1753 году. Такие молниеотводы используются и теперь в виде одиночных и групповых конструкций.

Высоковольтные линии электропередач защищаются от прямых ударов молнии специальными грозозащитными тросами, располагаемыми над проводами ЛЭП (см. рис. 31).

Защиту от шаровых молний люди до сих пор не придумали ввиду редкости этого явления.

обладающая значительной емкостью, отключенная выключателем, может долго сохранять значительный заряд и опасное для жизни напряжение. Лишь постепенно эти заряды могут нейтрализоваться за счет тока утечки изоляции (см. раздел 5). И чем выше качество изоляции и соответственно меньше ток утечки, тем дольше остается заряженным и, следовательно, опасным конденсатор.

Величина остаточного напряжения зависит от момента и характера процесса выключения: при отключении кабеля с колебательным процессом наибольшее напряжение, которое возникает, может почти в два раза превысить номинальное.

То же возникает при отключении ненагруженной воздушной линии электропередач. Чтобы предотвратить поражение электрическим током разряда, достаточно разрядить конденсатор с помощью разрядного устройства (см. рис. 3). Пренебрежение этим правилом может привести к тяжелым последствиям*.

Другой, более серьезной опасностью, является возможность взрыва и пожара взрывоопасных сред при пробое «естественных» конденсаторов. Так как емкость их очень мала, то небольшие количества электричества, или заряд, могут развить на них высокое напряжение, достаточное для пробоя. Возникающая при этом искра может «поджечь» взрывоопасную смесь**.

Виновниками многих первоначально «беспричинных» взрывов и пожаров, как выяснилось, были «естественные» конденсаторы. Так как в большинстве случаев они накапливают заряды, возникающие в результате электризации пыли, причем чем меньше влажность, тем быстрее и до большего потенциала они заряжаются, то для предотвращения пробоев этих конденсаторов необходима хорошая вентиляция и увлажнение среды, где это допустимо. Во влажной среде сопротивление утечки

* Известны случаи поражения со смертельным исходом при прикосновении к отключенному, но «неразряженному» кабелю высокого напряжения. К счастью, эти случаи очень редкие.

** В декабре 1977 года в порту одного из городов штата Луизиана произошел взрыв зерновой пыли на элеваторе в результате разряда накопленного статического электричества. При взрыве погибло несколько человек и от пожара пострадали элеватор и зерно.

«естественных» конденсаторов мало и мощности «источника зарядов» не хватает для повышения их потенциала до опасного уровня.

23. Какую опасность представляют конденсаторы сосредоточенной емкости?

Такой конденсатор как основной элемент электрических схем при определенных условиях может угрожать здоровью и даже жизни человека. Прежде всего это опасность поражения электрическим током при разряде заряженного конденсатора.

Отключенный от сети или устройства конденсатор может сильно «ударить» спустя довольно значительный промежуток времени и после его отключения. Особенно «коварны» герметичные конденсаторы с пленочным или бумажно-пленочным непропитанным диэлектриком, имеющие очень большую постоянную времени саморазряда.

Более того, можно почувствовать удар от конденсатора, который некоторое время назад был разряжен. Причина в том, что при малых временах разряда в конденсаторе не успевает произойти полная деполяризация диэлектрика и он как бы подзаряжает сам себя, перераспределяя заряды в толще диэлектрика.

Опаснее ли конденсаторы как источники электрической энергии, чем, например, сеть переменного или постоянного тока? Для ответа на этот вопрос необходимо знать, что обуславливает опасность, почему она возникает, от чего зависит.

Считается, что опасные величины токов при длительном воздействии составляют около $(15-20) \cdot 10^{-3}$ А для переменного* частотой 50 Гц и $(60-80) \cdot 10^{-3}$ А для постоянного тока. Таким образом, опасен ток — его величина, а опасное напряжение зависит от сопротивления пути, по которому этот ток замыкается. Величина опасного напряжения зависит от физического и эмоциональ-

* Переменный ток больше $50 \cdot 10^{-3}$ А считается смертельным, хотя известны случаи, когда человек оставался живым после воздействия токов гораздо больших значений.

ного состояния человека и ряда других факторов, например, времени суток, погоды, а также от сопротивления изоляции (в основном обуви), если на человека действует потенциал относительно Земли.

Величина сопротивления человека, большая часть которого сосредоточена в наружном слое его кожи, колеблется в очень широких пределах и составляет для разных людей от нескольких сотен ом до десятков тысяч ом. Очень большой разброс для разных людей имеет и величина опасного тока, которая вдобавок не постоянна у одного и того же человека, а так же, как и его сопротивление, может меняться в зависимости от разных факторов, в частности от возраста и др. Опасная величина тока зависит и от длительности его протекания, частоты, формы (в гораздо меньшей степени) при переменном токе.

Численные характеристики всех этих влияний известны приближенно, так как основные данные по ним получены из печального и не всегда ясного опыта практики.

Качественные зависимости вероятности поражения током от частоты тока (a) и времени его воздействия на человека (b), а также зависимость безопасной величины тока от времени протекания ($в$), известные из практики, показаны на рис. 38.

Опасные и безопасные характеристики импульсного

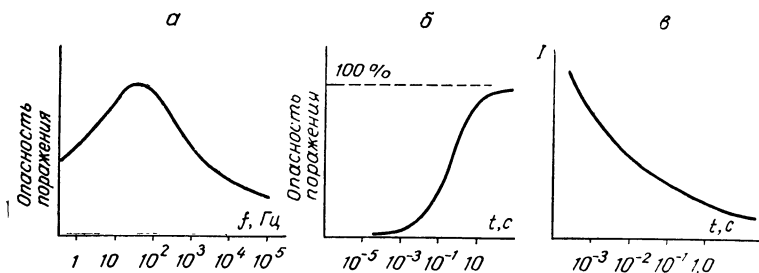


Рис. 38. Качественные зависимости степени опасности электрического тока от его частоты (a), длительности его воздействия ($б$) и зависимость безопасной величины тока I от времени его воздействия ($в$)

разряда* конденсаторов на человека известны в самых общих чертах, поскольку статистика случаев из практики очень незначительна, а специальные эксперименты опасны для жизни и здоровья человека. Качественные связи следующие: опасность поражения со смертельным исходом электрическим током при разряде конденсатора тем больше, чем выше напряжение и емкость конденсатора. Другими словами, вероятность поражения растет с увеличением энергии конденсатора $\left(W = \frac{CU^2}{2}\right)$.

Но учитывая, что чем меньше продолжительность воздействия, тем выше опасное значение величины тока (рис. 38, в), безразлично, как достигается одна и та же энергия разряда: увеличением напряжения U или увеличением емкости конденсатора C . Так, если конденсатор заряжен до напряжения, являющегося безопасным при постоянном воздействии, например до 4,5 В (напряжение батарейки карманного фонаря), то при любой емкости конденсатора, при которой его энергия может быть очень велика, разряд на человека не опасен.

Если разряжается конденсатор малой емкости, большая энергия заряда которого достигнута за счет высокого напряжения (вспомните «уколы» «естественных» конденсаторов, о которых шла речь), то опасность для жизни человека будет также ничтожной.

Несмотря на большую амплитуду импульса разрядного тока (при малых емкостях ее безопасная величина может составлять десятки ампер), его действие на человека сильно ослабляется с уменьшением длительности разряда. Это происходит вследствие того, что организм реагирует на электрический ток по-разному при разной длительности, тем более, что ток быстро уменьшается по величине, а также из-за того, что при малых длительностях разряда (порядка миллионных долей секунды и менее) ток не проходит через жизненно важные центры, а распространяется в поверхностном слое кожи.

* При разряде конденсатора на резистор ток имеет максимальное значение $I_m = \frac{U_m}{R}$ в начальный момент времени ($t=0$) и затухает по экспоненциальному закону $i(t) = I_m \cdot e^{-t/\tau}$, где $\tau = RC$ — постоянная времени цепи; $R(\text{Ом})$ и $C(\text{Ф})$ — параметры цепи. Через время $t \approx 4\tau$ ток становится практически равным нулю.

Качественная зависимость опасной величины энергии от емкости (*а*) и напряжения конденсатора (*б*) приведена на рис. 39. Уникальные «невольные» эксперименты на людях с разрядом лейденской банки позволяют нанести на графики рис. 39 (звездочкой) безопасные соотношения энергии, емкости и напряжения.

Как уже упоминалось, тяжесть поражения и опасная величина тока зависят от пути, по которому он протекает. Наиболее опасен путь тока через левую руку к правой руке или ногам (в этом случае ток проходит близко к сердцу)*.

Однако, если даже путь разряда таков, что не угрожает жизни человека, например по участку руки, то разряд большой энергии может привести к сильной травме вследствие импульсного нагрева небольших участков тела, в основном в месте контакта. Может возникнуть ожог и даже эрозия в результате воздействия электрической дуги или быстрого парообразования в коже. Тяжесть травмы уменьшается при большой ем-

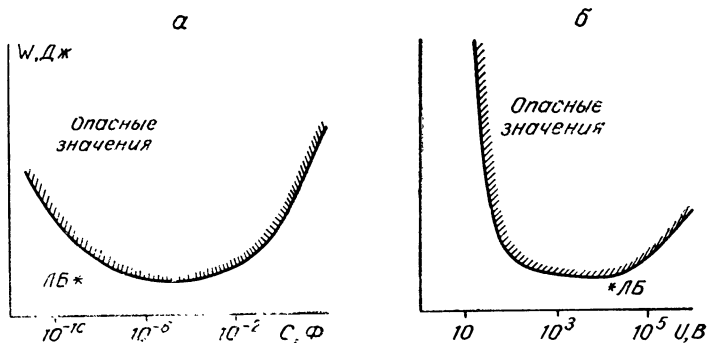


Рис. 39. Качественная зависимость опасной величины энергии заряженного конденсатора от его емкости (*а*) и напряжения (*б*). Звездочкой обозначены характеристики лейденской банки средних размеров

* Импульсный разряд конденсатора высокого напряжения в район расположения сердца применяется в медицинской практике для принудительного восстановления нормальной работы сердечной мышцы, находящейся в состоянии фибрилляции (хаотическое сокращение). В этом случае разряд конденсатора подавляет на короткое время беспорядочную деятельность мышцы, после чего восстанавливается ее нормальное управление импульсами, поступающими из мозга.

кости и низких напряжениях (т. е. при параметрах, лежащих в правой части рис. 39, б), так как энергия при больших емкостях и более низких напряжениях конденсаторов выделяется постепенно, и тепло успевает рассеяться, не причинив вреда.

Необходимо помнить, что некоторые конденсаторы могут взрываться и гореть, т. е. быть причиной механических разрушений и пожаров. Взрываться могут только конденсаторы с герметичными корпусами. Причина их взрывов — накопление газов внутри корпуса из-за сильного нагрева.

Малогабаритные конденсаторы не могут накопить много газов и поэтому взрываются эффектно (звук напоминает пистолетный выстрел), но без особых разрушений. Особенно опасны взрывы силовых крупногабаритных конденсаторов, корпуса которых прочны, из-за чего они разрываются при большом давлении, достигающем единиц, а иногда десятков атмосфер, т. е. давление здесь достигает единиц и десятков кг/см².

Особенно ужасны последствия взрыва конденсатора, когда он пробивается и через него протекает ток короткого замыкания мощной питающей сети, а также ток разряда параллельно включенным конденсаторам батареи. Этот ток может достигать десятков и сотен тысяч ампер. Из-за большого тепловыделения (в конденсаторе при коротком замыкании «горит» дуга) происходит очень интенсивное газообразование. В результате термического разложения диэлектрика внутреннее давление повышается чрезвычайно быстро. Затем конденсатор механически разрушается, разрывается, что сопровождается сильным звуком и разбрасыванием материалов и деталей конденсатора в радиусе до нескольких сот метров.

Некоторые читатели, возможно, были свидетелями взрывов электролитических конденсаторов, которые происходят при их пробое или перегреве. Масштабы разрушений, конечно, значительно меньше, чем при взрыве силовых конденсаторов: корпус конденсатора обычно отрывается от крышки, а хлопья бумаги, пропитанной электролитом, разбрасываются по аппаратуре.

Взрывы таких конденсаторов опасны при наладке аппаратуры, когда они могут причинить серьезную травму. «Выстреливать» вследствие сильного перегрева мо-

гут также пленочные конденсаторы, в том числе и маленькие. При высокой температуре пленочный диэлектрик образует большое количество газов. Цилиндрические конденсаторы «выстреливают» в осевом направлении, обычно некоторой (меньшей) частью секции.

Конденсаторы могут «взорваться» только при большой подводимой мощности, т. е. если ее достаточно для нагрева диэлектрика до температуры термического разложения. Это обуславливает большую вероятность взрывов силовых конденсаторов.

Так как при взрыве образуются газы, пары пропитывающей жидкости, если конденсатор пропитан, электрическая дуга «поджигает» эти вещества, в результате сразу же после взрыва возникает пожар, который трудно погасить. Гореть может также твердый диэлектрик органического происхождения. При этом некоторые диэлектрики (например, фторопласт, хлордифенилы и другие) дают токсичные продукты горения. Взрывы конденсаторов наносят механические повреждения окружающим их элементам и оборудованию.

К счастью, взрывы и пожары конденсаторов — редкое явление. При разработке конструкции конденсаторов принимаются меры по обеспечению их пожаро- и взрывобезопасности. Однако, несмотря на высокую степень обеспечения взрыво- и пожаробезопасности, такие случаи еще встречаются на практике из-за многочисленности и распространенности конденсаторов, особенно в электронной аппаратуре. Иногда взрывы и пожары силовых конденсаторов вызываются ошибками при эксплуатации.

В основном силовые конденсаторы изолированы от человека: в закрытом помещении, в шкафах, на открытой и удаленной от людей подстанции. И вероятность непосредственной угрозы для жизни человека очень низка (гораздо ниже, чем, например, от автомобиля на улице).

24. Как сделать обращение с конденсаторами безопасным?

Обеспечение электробезопасности при работе с электрическими устройствами предусматривается специальными инструкциями и правилами.

Особенность конденсаторов в том, что даже при отключении их от источника питания или установки от питающей сети на них длительное время может существовать опасный заряд. Для обеспечения электробезопасности схемным путем создают условия для быстрого разряда конденсатора или батареи конденсаторов после их отключения от питающей сети. Наиболее простой способ обеспечения разряда — это установка параллельно конденсаторам резисторов (рис. 40, а). Сопротивление разрядного резистора R_p зависит от емкости конденсатора и необходимого времени разряда*. За это время конденсаторы должны успеть разрядиться до безопасного уровня напряжения. Величина его определяется условиями, в которых находятся конденсаторы и эксплуатационный персонал.

Так как напряжение на конденсаторах при их разряде на резистор изменяется во времени по закону $u(t) = U_0 e^{-t/R_p C}$ (где U_0 — начальное напряжение), зная U_0 , допустимое остаточное напряжение, время t (оно нормируется) и емкость C , можно найти величину разрядного сопротивления. Разрядные сопротивления бывают внешними — подключаемыми снаружи к конденсатору или батарее, и внутренними — встроенными в корпус конденсатора.

Система обеспечения разряда с внутренними резисторами надежнее при параллельном включении нескольких конденсаторов, так как в случае отказа одного из резисторов разряд будет обеспечен через резисторы других конденсаторов. Однако встроенные резисторы дополнительно греют конденсаторы, и такой способ применяется обычно в высоковольтных конденсаторах.

Общий недостаток системы с постоянно включенными разрядными резисторами в том, что они обуславливают потери энергии, мощность которых равна $\frac{U^2}{R_p}$ (U — действующее напряжение на конденсаторах). Чтобы устранить эти потери, конденсаторы подключают на разрядные резисторы с помощью специального переключо-

* Согласно международным нормам, время разряда конденсаторов до напряжения в 50 В должно составлять не более одной минуты при номинальном напряжении конденсаторов не выше 660 В и не более пяти минут при более высоких номинальных напряжениях.

чателя (см. рис. 40, а). Использование электрических лампочек в качестве разрядных резисторов обеспечивает, с одной стороны, визуальное наблюдение за разрядом (лампы при этом «потухают»), с другой — более быстрый разряд конденсаторов, так как сопротивление лампочки падает с уменьшением тока.

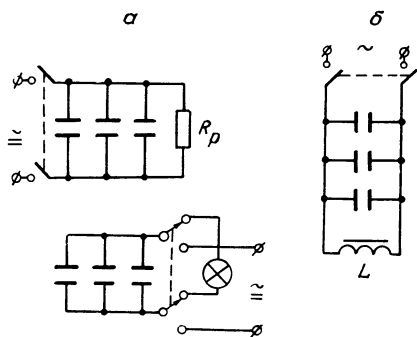
Для уменьшения расхода энергии и тепловыделения, в частности в замкнутых пространствах, целесообразно применять реактивные разрядные элементы — дроссели (рис. 40, б). Однако это техническое решение дороже, хотя в ряде случаев экономия электроэнергии при этом может окупить первоначальные затраты. Таким образом, разрядное устройство непосредственно подсоединяется к конденсатору или к общим шинам батареи параллельно включенных конденсаторов. Несмотря на указанные меры, каждый конденсатор должен быть разряжен с помощью разрядного стержня, укрепленного на изоляционной штанге.

Напомним, что конденсаторы с высоким значением коэффициента абсорбции (отношения величины восстанавливающегося на обкладках конденсатора напряжения после их размыкания к величине напряжения до их замыкания), такие, например, как бумажные, керамические, электролитические и другие, обладают способностью после кратковременного разряда восстанавливать напряжение.

Особенно существенная величина напряжения восстанавливается на конденсаторе, который длительное время (десятки минут—часы) находился под воздействием постоянного напряжения, а разряжался кратко-

временно. На практике могут иметь место случаи восстановления напряжения до нескольких десятков процентов от номинального.

Р и с. 40. Схемы, обеспечивающие быстрый разряд конденсаторов при его отключении от источника электрической энергии с помощью резисторов (а) и катушек индуктивности (б)



Постоянный потенциал может также возникнуть на выводах конденсатора в электрическом поле за счет электризации в насыщенной электричеством атмосфере. Поэтому при транспортировке, монтаже, ремонте и других работах рекомендуется соединять выводы конденсаторов вместе с корпусом гибким многожильным проводником — перемычкой.

Для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности рекомендуется обычно устранять из эксплуатации конденсаторы со вздувшимися корпусами, со следами течи пропитывающей жидкости и т. д. Более надежных внешних признаков, информирующих о том, что возможен взрыв, и тем более пожар, конденсатора в настоящее время нет.

Локализация последствий взрывов конденсаторов может производиться конструктивными мерами, например созданием защитных сетчатых оболочек, которые не препятствуют охлаждению конденсаторов и задерживают «осколки» при взрыве.

Однако основные мероприятия, обеспечивающие пожаро- и взрывобезопасность конденсаторов, реализуются путем создания соответствующих конструкций применением различных предохранителей, материалов, корпусов и т. д., а также с помощью внешней защиты конденсаторов от перенапряжений, перегрузок по току и др.

* *
*

Итак, конденсатор — первый элемент электрических устройств, изобретенный человеком,— продолжает совершенствоваться. Исследованиями и разработками конденсаторов заняты многочисленные коллективы ученых и инженеров.

Внешне простой элемент, конденсатор таит в себе еще много неясного. Непросто постичь все его «тайны». Однако они познаются исследователями. Одна из основных «тайн» конденсатора — долговечность, и здесь требуется планомерный поиск и настойчивость.

В последнее время большое внимание уделяется разработке новых конденсаторов, наиболее полному и рациональному использованию всех возможностей, заложенных в них.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Карцев В. П.
Приключения великих уравнений. М., «Знание», 1970.
2. Ренне В. Т.
Электрические конденсаторы. Л., «Энергия», 1969.
3. Ренне В. Т.
Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком. Л., «Энергия», 1971.
4. Ануфриев Ю. А., Гусев В. Н., Смирнов В. Ф.
Эксплуатационные характеристики и надежность электрических конденсаторов. М., «Энергия», 1976.
5. Кучинский Г. С. и др.
Силовые электрические конденсаторы. М., «Энергия», 1975.
6. Незнайко А. П., Геликман Б. Ю.
Конденсаторы и резисторы. М., «Энергия», 1974.
7. Незнайко А. П.
Новые типы конденсаторов. Л., «Энергия», 1970.
8. Михайлов И. В., Пропошин А. И.
Конденсаторы. М., «Энергия», 1973.
9. Звенигорский И. С.
Конденсаторы связи и отбора мощности. М., «Энергия», 1969.
10. Деммер Дж. В. А., Норденберг Г. М.
Конденсаторы постоянной и переменной емкости. М., Госэнергоиздат, 1963.
11. Торощин П. А.
Металлобумажные конденсаторы. М., ГЭИ, 1965.
12. Уилсон М.
Американские ученые и изобретатели. М., «Знание», 1964.